

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR DE ECONOMIA E GESTÃO

MESTRADO EM GESTÃO E ESTRATÉGIA INDUSTRIAL

Avaliação do Impacte de Diferentes Configurações de
Recursos no Desempenho de um Sistema de Produção por
Encomenda

RUI FILIPE CERQUEIRA QUARESMA

Orientador: Professor Doutor Alberto Augusto Ferreira Pereira

Júri:

Presidente: Professor Doutor Alberto Augusto Ferreira Pereira

Vogais: Professor Doutor Luís António Nunes Lourenço

Professora Doutora Maria Clara Peres Sousa Cabrita dos Santos

Junho de 1997

RESUMO

Este trabalho avalia o impacto resultante da utilização de diferentes configurações no desempenho de um sistema de produção por encomenda. O sistema de produção por encomenda analisado é uma central radial de produção de betão e o seu desempenho é medido em relação ao número médio de encomendas executadas e ao tempo médio da encomenda no sistema.

Na análise foi utilizado um modelo de simulação digital onde alguns parâmetros considerados críticos para o funcionamento do sistema, como os recursos de transporte, a regra de sequenciamento de fabrico de encomendas recebidas e a capacidade de colocação do betão, foram utilizados como factores experimentais.

Os resultados do modelo mostram que os recursos de transporte, a regra de sequenciamento de fabrico de encomendas recebidas e a capacidade de colocação do betão têm um impacto significativo no desempenho da central radial de produção de betão.

PALAVRAS CHAVE: BETÃO, PRODUÇÃO POR ENCOMENDA, REGRAS DE SEQUENCIAMENTO, SIMULAÇÃO DIGITAL.

ABSTRACT

This research evaluates the impact derived from the utilization of different manufacturing scenarios on the performance of a make-to-order system. The system under study is a radial production center of concrete and its performance is measured with respect to the mean number of filled orders and to the mean time an order spends in the system.

A digital simulation model was applied to analyze the system. Some critical parameters such as transportation resources, the rules used to sequence orders and the processes used to deliver the concrete were modeled as experimental factors.

Results show that the transportation resources, the sequencing rules and the delivering processes all have a significant impact on the performance of the production center.

KEY WORDS: CONCRETE, MAKE-TO-ORDER SYSTEM, SEQUENCING RULES
AND DIGITAL SIMULATION MODEL.

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	3
ÍNDICE	4
LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE FIGURAS	8
AGRADECIMENTOS	9
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO II - A INDÚSTRIA DE BETÃO PRONTO	13
Introdução	13
Matérias-Primas e Características do Betão	19
Resumo	23
CAPÍTULO III - REVISÃO DA LITERATURA	24
Introdução	24
O Planeamento da Capacidade de Produção	26
Utilização da Capacidade de Produção	32
O Sequenciamento da Produção por Encomenda	36
O Sequenciamento das Actividades com Restrições de Recursos	52
O Sequenciamento das Actividades com Restrições de Recursos Utilizando Heurísticas	55
O Sequenciamento das Actividades com Restrições de Recursos Utilizando Modelos de Optimização	62

Resumo	68
CAPÍTULO IV - METODOLOGIA	71
Factores Experimentais	71
Descrição do Processo de Produção do Betão na Empresa ABC.....	77
O Modelo de Simulação	87
Verificação do Modelo	97
Resumo	97
CAPÍTULO V - RESULTADOS	98
Estudo Experimental	98
Estudo Principal	102
Resultados para o Número Médio de Encomendas Executadas.....	106
Resultados para o Tempo Médio da Encomenda no Sistema	111
Resumo	121
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	123
BIBLIOGRAFIA	129

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Edifícios concluídos segundo o elemento resistente essencial da construção	16
Tabela II - Qualidades de Betão	22
Tabela III - O Desenho Experimental	75
Tabela IV - Configurações do Estudo Experimental	Erro! Marcador não definido.
Tabela V - Resultados da Análise de Variância do Estudo Experimental.....	101
Tabela VI - Número Médio de Encomendas Executadas.....	106
Tabela VII - Análise de Variância da Variável Número Médio de Encomendas Executadas.....	107
Tabela VIII - Número Médio de Encomendas Executadas (Recursos de Transporte × Regra de Sequenciamento).....	109
Tabela IX - Número Médio de Encomendas Executadas (Recursos de Transporte × Capacidade de Colocação).....	110
Tabela X - Tempo Médio da Encomenda no Sistema.....	112
Tabela XI - Análise de Variância da Variável Tempo Médio da Encomenda no Sistema.....	113
Tabela XII - Tempo Médio da Encomenda no Sistema (Regra de Sequenciamento × Capacidade de Colocação) .	114

Tabela XIII - Tempo Médio da Encomenda no Sistema (Recursos de Transporte × Capacidade de Colocação).....	116
---	-----

Tabela XIV - Tempo Médio da Encomenda no Sistema (Recursos de Transporte × Regra de Sequenciamento × Capacidade de Colocação)	117
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura I - O Planeamento da Capacidade de Produção num sistema de Planeamento e Controlo da Produção	28
Figura II - A Central Radial da Empresa ABC.....	78
Figura III - A Rede Construída para o Modelo de Simulação (1/3).....	90
Figura III - A Rede Construída para o Modelo de Simulação (2/3).....	91
Figura III - A Rede Construída para o Modelo de Simulação (3/3).....	92
Figura IV - Evolução do Tempo Médio da Encomenda no Sistema para cada uma das cinco replicações da configuração 1.....	100

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Alberto Augusto Ferreira Pereira, Professor Associado do Instituto Superior de Economia e Gestão da Universidade Técnica de Lisboa, pela orientação desta tese e pelo apoio dispensado.

À minha esposa, Sandra, pela compreensão e apoio nunca negados durante a realização deste trabalho.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O volume de produção de betão de uma central radial é função da capacidade de produção instalada, expressa em metros cúbicos de betão por hora, dos recursos de transporte existentes e da capacidade de colocação do betão no local indicado pelo cliente. A produção de betão é um caso particular do problema de "produção por encomenda". O processo de produção do betão consiste na pesagem e mistura de areia, brita, cimento, água e adjuvantes químicos. Desta operação de mistura resulta o betão que é transferido para um camião-betoneira. O camião-betoneira efectua o transporte do betão entre a central de produção e o local indicado pelo cliente onde se procede à sua colocação. A operação de colocação consiste na transferência do betão do camião-betoneira para o local específico designado pelo cliente. Os recursos de transporte e a capacidade de colocação do betão são, assim, factores relevantes do desempenho global de um sistema de produção de betão.

Este estudo pretende avaliar em que medida os recursos de transporte, a regra de sequenciamento de fabrico de encomendas recebidas e a capacidade de colocação do betão influenciam a capacidade de produção de betão de uma central radial. Para o efeito, utilizam-se dados de produção reais de betão de uma empresa que opera uma central radial numa localidade a sul de Lisboa e que adiante se passa a designar por empresa ABC.

Com base nos dados recolhidos na empresa ABC, desenvolve-se um modelo de produção para simular o funcionamento da central sob várias configurações. Cada configuração é definida pela combinação dos níveis de cada um dos três factores experimentais utilizados neste estudo, respectivamente, os recursos de transporte, a regra de sequenciamento de fabrico de encomendas recebidas e a capacidade de colocação. Para o primeiro factor experimental, recursos de transporte, são definidos três níveis; para o segundo, dois, e, finalmente, para o terceiro, capacidade de colocação, três. No total serão, portanto, avaliadas ($3 \times 2 \times 3$) 18 configurações diferentes. O desempenho do sistema, para cada uma das dezoito configurações, será avaliado em relação ao número médio de encomendas executadas e ao tempo médio da encomenda no sistema.

Este estudo está organizado em seis capítulos. O capítulo II apresenta alguns aspectos sobre a história do betão, a indústria de betão pronto em Portugal, e as matérias-primas utilizadas na sua produção. No capítulo III é feita a revisão da literatura sobre o sequenciamento da produção por encomenda e o sequenciamento de actividades com restrições de recursos. Aflora-se também o problema do planeamento da capacidade de produção e da sua utilização. O capítulo IV descreve a metodologia utilizada para avaliar o desempenho da central de produção de betão. O capítulo V descreve o estudo experimental realizado e apresenta e

analisa os resultados obtidos. Finalmente, no capítulo VI, são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO II

A INDÚSTRIA DE BETÃO PRONTO

Introdução

A indústria de betão pronto é constituída pelo conjunto de empresas que se dedica à produção de betão em centrais especializadas e consequente transporte, no estado fresco, em camião-betoneira até ao local de colocação na obra. A colocação do betão na obra é, normalmente, um serviço adicional prestado pelas empresas produtoras. O betão “é um material de construção civil que se obtém misturando intimamente uma argamassa (por sua vez mistura de cimento, areia e água) com materiais inertes britados ou rolados, de certas dimensões, em geral entre 5 e 50 milímetros, e eventualmente adjuvantes químicos” [Viseu, 1993].

Em Portugal, a indústria de betão pronto, de acordo com a Revisão 1 da Classificação Portuguesa das Actividades Económicas (1973), está incluída nas actividades de “Fabricação de Artigos de Cimento e Marmorite”, com o código 369930. A Revisão 2 (1991) daquela Classificação isolou-a na categoria “Fabricação de Betão Pronto” e alterou-lhe o respectivo código para 26630.

O desenvolvimento da indústria de betão pronto está associado a dois inventos verificados no século XIX, o do cimento *portland* e o do betão armado, respectivamente. O cimento *portland* foi inventado em 1817, por Louis Vicaut, tendo-lhe sido atribuída a designação *portland* pelo facto de este tipo de cimento produzir uma massa pétrea semelhante em

cor, solidez e durabilidade ao então bem conhecido calcário da ilha de Portland [Coutinho, 1988]. Em 1848, Joseph-Louis Lambot inventa o betão armado, em Miramar, na região de Var, França. O betão armado, que resulta da aplicação do betão a uma armadura de aço ou ferro, foi o material utilizado por Lambot para construir uma barca. Depois da construção desta primeira barca que, segundo relatos da época, chegou mesmo a navegar num lago da propriedade da família, Lambot fabricou outras, uma das quais foi apresentada na Exposição Universal de Paris de 1855 [Viseu, 1993].

As obras levadas a cabo pelo construtor François Hennebique, os estudos experimentais e teóricos de Considéré, Rabut e Mesnager estabeleceram as leis fundamentais da resistência do betão armado no final do século XIX. O início da utilização do betão na arquitectura da época pelo arquitecto Auguste Perret foi decisivo para a introdução do betão armado como material de construção civil [Coutinho, 1988]. Em Portugal, as primeiras obras de betão armado surgiram após o início da produção de cimento *portland* na fábrica de cimento localizada em Alhandra, em 1894 [Coutinho, 1988]. No ano seguinte, o construtor François Hennebique efectuou, por intermédio de um procurador, um registo de patente de invenção do betão armado na Repartição da Indústria do Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria, em Lisboa [Ferreira, 1995].

O betão armado, como sucede com qualquer novo produto ou tecnologia, enfrentou algumas dificuldades de aceitação nos primeiros anos. Este material de construção tinha que se

impor à presença “de um outro material - o ferro, forjado e fundido - que, sobretudo, as realizações espectaculares do século das exposições universais e do caminho de ferro haviam projectado com êxito no meio cultural das sociedades europeia e norte-americana” [Ferreira, 1995]. Embora a introdução do betão em Portugal tenha ocorrido ainda no final do século XIX (1895), só a partir de 1965, ano em que a empresa *BETÃO LIZ* instalou em Lisboa a primeira central de produção de betão pronto, é que se pode falar da existência de indústria de betão pronto em Portugal [Camejo, 1991].

Os dados estatísticos recolhidos pela Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto revelam que existiam em Portugal Continental, em meados de 1996, 34 empresas produtoras de betão pronto, operando 144 centrais de fabrico [Pato, 1996].

Nos últimos anos, a utilização do betão nas suas diversas variantes tecnológicas tem assumido um papel de destaque na construção, com aplicação nos mais diversos tipos de obras. A Tabela I mostra que, na construção de edifícios, o betão é o elemento resistente essencial da construção de maior utilização no período 1991-92.

**Tabela I - Edifícios concluídos segundo o elemento
resistente essencial da construção**

	Tijolo	Estrutura Betão Armado	Pedra	Blocos de Cimento	Madeira	Estrutura Metálica	Outras	TOTAL
1991	2 390	26 017	54	1 518	4	2	--	29 985
%	7,97	86,77	0,18	5,06	0,01	0,01	--	100,00
1992	1 754	22 594	34	1 014	11	--	--	25 407
%	6,90	88,93	0,13	3,99	0,04	--	--	100,00

Fonte: Estatísticas da Construção de Edifícios - Licenciamento/Habitação; Instituto Nacional de Estatística, Lisboa, 1994 [INE, 1994].

Várias razões podem ser apontadas para a elevada utilização do betão na construção de edifícios: (i) processo produtivo relativamente simples e com um consumo de energia reduzido; (ii) disponibilidade de matérias primas na natureza; (iii) baixo custo de produção e de manutenção; (iv) possibilidade de ser trabalhado, apresentando um elevado nível de adaptação às mais variadas formas arquitectónicas; (v) elevada resistência, sobretudo quando combinado com o aço; (vi) material não combustível e, (vii) compatibilidade com outros materiais, originando novas soluções tecnológicas na construção [Anónimo, 1].

Na construção de estradas e auto-estradas, apesar da predominância de utilização de "pavimentos flexíveis", Prates [1995] sustenta que a curto prazo se assistirá a "uma reanálise da política de pavimentação, ... tornando os pavimentos rígidos e semi-rígidos economicamente interessantes, mesmo quando comparados ao nível do primeiro

investimento (custo de construção)". As alterações introduzidas no regulamento de transporte rodoviário de mercadorias, nomeadamente a alteração introduzida em 1985 aumentando a carga máxima admissível por eixo simples de 10 para 12 toneladas, aliadas às comprovadas deficiências da generalidade dos pavimentos em utilização, abriram novas perspectivas à utilização do betão como material de pavimentação [Prates, 1995].

Prates [1995] apresenta ainda outras razões para a introdução do betão como material de pavimentação: (i) falta de matérias-primas de qualidade, sobretudo para "camadas de desgaste"; (ii) crescimento do tráfego de pesados, a exigir pavimentos com um nível de resistência mais elevado; (iii) redução dos custos de conservação e dos períodos de intervenção; (iv) adopção de períodos de dimensionamento de 30 anos, face aos tradicionais 20 anos para os "pavimentos flexíveis" e, (v) contributo de determinadas empresas construtoras e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil para o relançamento desta técnica de construção.

Embora em Portugal a "indústria de betão pronto" tenha pouco mais de 30 anos, o seu produto final, o betão, é um produto com forte implantação no mercado e com um elevado potencial de crescimento. Em 1991 e 1992 cerca de 90% dos edifícios concluídos em Portugal utilizaram estruturas de betão armado como elemento resistente essencial da construção, como se indica na Tabela I. As obras em curso em Lisboa, nomeadamente a Exposição Mundial de Lisboa de 1998 (EXPO 98), a expansão da rede de transporte urbano

subterrâneo (metropolitano) e a construção da nova ponte sobre o rio Tejo, o reforço e ampliação da rede de infraestruturas viárias de acesso aos principais centros urbanos, a renovação e implantação dos parques habitacionais, associadas às novas aplicações que já vão sendo realizadas com o betão, nomeadamente em pavimentos, perspectivam um crescimento bastante significativo da utilização do betão, nos mais variados tipos de obras, para os próximos anos [Anónimo, 2; Anónimo, 3].

A Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto (APEB) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) são duas organizações que têm, de formas distintas, desempenhado um papel muito importante para o desenvolvimento da indústria de betão pronto em Portugal. A APEB é uma organização sem fins lucrativos, constituída em 1985, congregando quinze das principais empresas produtoras de betão pronto a operar em Portugal. Nos estatutos da APEB são definidos como objectivos básicos: (i) a representação profissional e defesa dos interesses das indústrias de betão pronto; (ii) o fomento e expansão do sector; (iii) a prestação de formação profissional especializada e, (iv) a promoção e garantia da qualidade do betão e respectivas matérias-primas. Para o cumprimento do último objectivo, a APEB possui um Laboratório de ensaios reconhecido pelo Instituto Português de Qualidade [Anónimo, 3].

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) é um organismo tutelado pelo Governo, criado em 1947 a partir do Laboratório de Ensaio de Materiais e do Centro de Estudos de

Engenharia Civil, que se dedica à investigação no domínio da Engenharia Civil [Oliveira, 1991]. Dos sete departamentos que constituem o LNEC, destacam-se o Departamento de Estruturas e o Departamento de Materiais de Construção. Estes dois departamentos têm efectuado diversos trabalhos de investigação sobre betão, aço, betão armado e pré-esforçado, em modelos ou em protótipos. Nos laboratórios do LNEC são realizados também os ensaios necessários à homologação ou classificação do aço e betão a usar no betão armado ou pré-esforçado [Viseu, 1993].

Matérias-Primas e Características do Betão

São seis as matérias-primas utilizadas na produção de betão: água, cimento, cinzas volantes, brita, areia e adjuvantes químicos.

A água é utilizada na produção do betão para assegurar o endurecimento do cimento e para garantir a maleabilidade do betão. Quanto menor for a quantidade de água utilizada na produção, maior a resistência do betão. De uma maneira geral, todas as águas potáveis e as não potáveis, inodoras e insípidas, podem ser utilizadas na amassadura do betão. A qualidade da água influencia as propriedades do betão através das substâncias dissolvidas e em suspensão que nela existem [Coutinho, 1988].

O cimento mais utilizado na produção de betão é o chamado cimento *portland* e a sua qualidade é um factor determinante para a qualidade do betão. Esta matéria-prima é também conhecida como ligante hidráulico. Esta designação

resulta, por um lado, da propriedade que o cimento tem de conseguir aglomerar areia e brita (ou godo), ao mesmo tempo que lhes confere coesão e resistência (ligante); por outro lado, além de endurecer ao ar, também apresenta a característica de suportar perfeitamente a acção da água (hidráulico) [Coutinho, 1988].

As cinzas volantes são uma matéria-prima resultante da combustão das centrais térmicas e são utilizadas em substituição do cimento. No entanto, a quantidade de cinzas volantes utilizada na produção de betão não pode, em Portugal, por restrições de ordem legal, ser superior a 25% do peso total do cimento necessário. O uso desta matéria-prima, além do efeito positivo nos custos de produção, resultante da redução da quantidade de cimento utilizada, tem também um efeito positivo na durabilidade do betão, ao contribuir para um aumento do período de vida do betão.

A brita é uma matéria-prima que resulta da britagem de rochas. Na produção de betão pode utilizar-se um de três tipos de brita, os quais diferem entre si pela sua dimensão. A utilização do tipo de brita depende do tipo de betão a produzir. Em casos pontuais devidamente justificados, pode utilizar-se, em alternativa, o chamado godo, que é um calhau rolado de origem aluvionar. Algumas das propriedades deste inerte, nomeadamente forma e dimensão proporcionadas, resistência às forças, propriedades térmicas e químicas e isenção de substâncias prejudiciais, são fundamentais para o comportamento do betão [Coutinho, 1988].

A areia é uma substância mineral que, tal como a brita, também é designada por inerte. Na produção de betão são utilizados dois tipos de areia que variam consoante a sua granulometria. Em sua substituição pode ser utilizado pó de pedra.

Os adjuvantes químicos são substâncias utilizadas em percentagem inferior a 5% da massa de cimento, adicionadas durante a amassadura aos componentes normais das argamassas e betões, com o fim de modificar certas propriedades destes materiais, tanto no estado fluído, como no estado sólido, e na passagem de um a outro estado [Coutinho, 1988]. A utilização destes produtos visa alcançar determinados efeitos, nomeadamente reduzir a quantidade de água utilizada na amassadura, reduzir a quantidade de cimento utilizada, retardar a secagem do betão (facilitando assim o fornecimento a obras mais distantes), repelir a água, etc.

Existem sessenta qualidades diferentes de betão, divididas por quatro tipos de betão distintos: plástico, muito plástico, fluído e dosagem. Os três primeiros tipos de betão - plástico, muito plástico e fluído - distinguem-se entre si pela maleabilidade. Um betão do tipo fluído apresenta uma maior maleabilidade que um betão plástico. O quarto tipo, o betão dosagem, utiliza-se em aplicações particulares, nomeadamente na regularização de solos. Cada um dos tipos de betão mencionados é ainda subdividido em classes:

- Seis classes, B15, B20, B25, B30, B35 e B40 para o betão plástico, muito plástico e fluído. As classes

distinguem-se entre si pela resistência do betão, expressa em megapascals pelo número incluído na respectiva designação. Estas seis classes estão divididas em três inertes (15, 25 e 35) correspondentes à dimensão máxima da granulometria da brita utilizada.

- Seis classes, D150, D175, D200, D250, D300 e D350, para o betão dosagem. As classes distinguem-se entre si pela quantidade de cimento utilizada, expressa em quilos pelo número incluído na respectiva designação, por metro cúbico de betão.

A Tabela II mostra as diferentes qualidades de betão, divididas por tipos, classes e inertes.

Tabela II - Qualidades de Betão

Betão Plástico (P)		Betão Muito Plástico (MP)		Betão Fluido (F)		Betão Dosagem (D)
Classe	Inerte	Classe	Inerte	Classe	Inerte	Classe
B15	35	B15	35	B15	35	D150
	25		25		25	
	15		15		15	
B20	35	B20	35	B20	35	D175
	25		25		25	
	15		15		15	
B25	35	B25	35	B25	35	D200
	25		25		25	
	15		15		15	
B30	35	B30	35	B30	35	D250
	25		25		25	
	15		15		15	
B35	35	B35	35	B35	35	D300
	25		25		25	
	15		15		15	
B40	35	B40	35	B40	35	D350
	25		25		25	
	15		15		15	

Fonte: dados obtidos junto da empresa ABC.

O processo produtivo é sempre o mesmo, independentemente da qualidade de betão pretendida. A obtenção de uma determinada qualidade, depende das quantidades e tipos de matérias-primas utilizadas no processo produtivo.

O betão é um produto perecível. Algumas horas após a mistura das diversas matérias-primas, passa ao estado sólido, tornando-se impossível a sua colocação em qualquer tipo de obra. A passagem ao estado sólido pode ser retardada através da adição de adjuvantes químicos específicos ao processo de produção do betão.

Uma vez que se trata de um produto perecível não armazenável, a produção do betão só tem início quando existe uma encomenda. O cumprimento dos prazos de entrega pode suscitar um dos dois problemas seguintes: (i) se o betão for entregue antes da data/hora marcada pelo cliente, há o risco de a obra ainda não estar preparada para se proceder à colocação do betão, podendo este ser inutilizado e, (ii) quando a entrega ocorre num momento posterior à data/hora marcada pelo cliente, a obra pode sofrer atrasos no cumprimento do prazo de conclusão previsto, podendo a empresa fornecedora do betão ter de indemnizar o cliente.

Resumo

Este capítulo apresentou uma panorâmica geral da indústria de betão pronto. Foi feita uma descrição das matérias-primas utilizadas na produção do betão, para além de uma descrição geral das características do betão.

CAPÍTULO III

REVISÃO DA LITERATURA

Introdução

A produção de betão pronto é um caso particular do problema de “produção por encomenda”. Vollmann, Berry e Whybark [1984] referiram que a produção por encomenda é frequentemente necessária quando existem várias configurações de produtos possíveis e, conseqüentemente, uma probabilidade reduzida de prever as necessidades de um cliente. A produção de betão pronto inclui-se nesta “definição” de Vollmann, Berry e Whybark [1984]. Na indústria de betão pronto existem 60 configurações de produtos diferentes.

Fumero e Vercellis [1994] referiram que têm sido realizados alguns esforços para adaptar os instrumentos tradicionais de planeamento da produção para inventário à produção por encomenda, nomeadamente a aplicação dos elementos básicos de um sistema MRP (*Material Requirements Planning*) num contexto de produção por encomenda de baixo volume. Estes autores referem, no entanto, que os problemas inerentes a cada um destes dois sistemas de produção, nomeadamente, os objectivos estratégicos e táticos, os mecanismos de controlo disponíveis e as características dos mercados, diferem substancialmente nos dois contextos, requerendo, por isso, acções específicas consoante se trate de produção para inventário ou por encomenda. Em particular, Fumero e Vercellis [1994] apresentaram os seguintes exemplos

de aspectos que distinguem os dois sistemas de produção: (i) as empresas que produzem por encomenda (EPE) não podem explorar as técnicas de gestão de capacidade utilizadas pelas empresas que produzem para inventário (EPI), como sejam o alisamento da cadência de produção e/ou a manutenção de *stocks* de segurança de produtos acabados; (ii) as EPE geralmente lidam com baixos volumes de produção não estando portanto motivadas para a utilização de políticas para a determinação de lotes económicos com vista à redução dos custos operacionais; (iii) os ambientes de produção por encomenda e de montagem por encomenda são caracterizados por uma grande volatilidade e imprevisibilidade dos requisitos de mercado, o que dificulta o estabelecimento de níveis planificados de capacidade; (iv) a realização de previsões de procura é difícil para as EPE, devido à grande variedade de produtos que podem ser fabricados; (v) a impossibilidade de manter existências de produtos acabados para equilibrar a incerteza da procura torna a situação ainda mais crítica e, (vi) os ambientes de produção por encomenda e de montagem por encomenda são caracterizados por um conjunto de objectivos estratégicos de desempenho mais vasto que num ambiente de produção para inventário.

Os aspectos indicados por Fumero e Vercellis [1994] revelam dificuldades acrescidas para as empresas que produzem por encomenda, sobretudo ao nível do planeamento da capacidade e do sequenciamento da produção.

A revisão da literatura que se apresenta neste capítulo aflora o problema do planeamento da capacidade de produção,

e da sua utilização e, com mais detalhe, revê a literatura sobre sequenciamento da produção por encomenda e sequenciamento das actividades com restrições de recursos.

O Planeamento da Capacidade de Produção

Uma das principais funções do planeamento da capacidade é a de estimar as cargas para cada estação de trabalho para cada um dos períodos futuros, assistir a gestão no ajustamento de recursos, obter informação antecipada sobre estrangulamentos e estimar datas credíveis de conclusão de encomendas recebidas. A dificuldade em alcançar estes objectivos num ambiente dinâmico e interactivo é evidente se se tiver em conta que o tempo dispendido por uma encomenda no sistema (*flowtime*) é função não apenas das características da encomenda e das regras utilizadas para estabelecer prioridades de lançamento de encomendas, como também depende do tipo e do estatuto das encomendas que já se encontram no sistema [Adam e Surkis, 1977].

Pinder [1995] referiu que a determinação das quantidades de recursos que devem estar disponíveis para que uma empresa possa produzir bens e serviços é um problema comum de gestão, conhecido como “problema de planeamento de recursos”. A natureza incerta da procura faz com que este planeamento seja revisto periodicamente. Desta forma, o gestor pode ajustar os níveis de recursos, equilibrando os custos de recursos inactivos com os custos da procura não satisfeita por escassez de recursos.

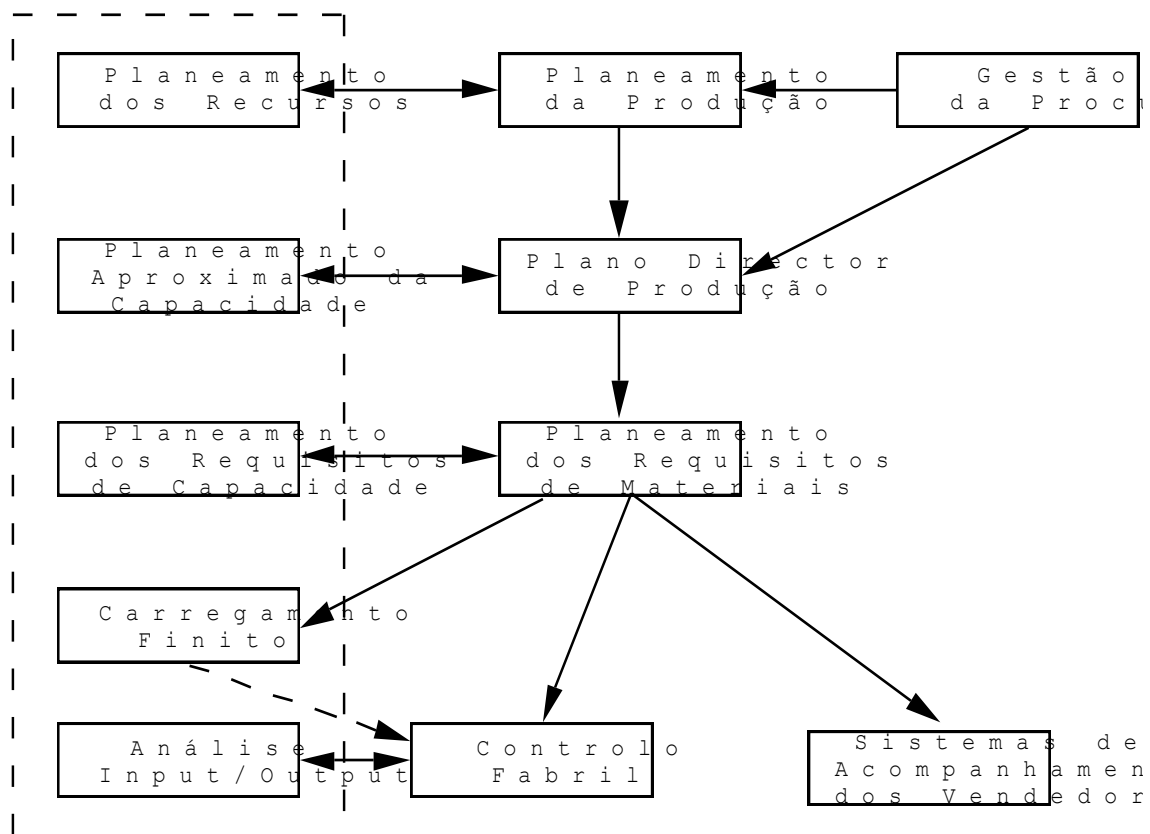
Holstein [1968] referiu que muitas situações de excesso de trabalho em determinados departamentos e de dificuldades no cumprimento de prazos de entrega, são imputáveis a problemas de sequenciamento ou de controlo. A verdadeira causa, no entanto, pode residir num desajustamento entre a capacidade de produção e a procura estimada ou em previsões de vendas pouco realistas. As previsões da procura, segundo Holstein [1968], são utilizadas para fundamentar decisões de longo prazo sobre a capacidade como, por exemplo, expansão das instalações fabris, aquisição de equipamento e aumento da força de trabalho. Mesmo em empresas que produzem por encomenda e onde não existe previsão formal da procura, a intuição dos gestores de topo sobre o estado da economia e o seu impacto no futuro da empresa, constituem um elemento importante para os planos futuros.

Vollmann, Berry e Whybark [1984] referiram que o objectivo de gestão com o planeamento da capacidade de produção é procurar assegurar a capacidade necessária para satisfazer os planos de produção da empresa. Referem ainda que sem a provisão da capacidade adequada, ou a constatação da existência de excesso de capacidade, não é possível retirar os benefícios de um sistema de planeamento e controlo da produção. A existência de capacidade insuficiente conduzirá rapidamente à deterioração dos tempos de entrega, a um aumento das existências de produtos em vias de fabrico e à frustração do pessoal da produção que procurará solucionar os problemas recorrendo ao sistema informal. Por outro lado, a existência de excesso de

capacidade constitui um encargo desnecessário que pode ser reduzido. O planeamento da capacidade deve portanto ser desenvolvido conjuntamente com os planos de materiais.

A Figura I mostra os cinco níveis do processo de planeamento da capacidade de produção, delimitados pela linha tracejada, e a sua relação com o processo de planeamento e controlo da produção.

Figura I - O Planeamento da Capacidade de Produção num sistema de Planeamento e Controlo da Produção



Fonte: Vollmann, Berry e Whybark [1984]

A Figura I ilustra a amplitude do planeamento da capacidade que começa com um plano geral de recursos, prossegue com uma avaliação aproximada das implicações de capacidade de um determinado plano director de produção, depois avalia detalhadamente os requisitos de capacidade com base nos registos detalhados do planeamento dos requisitos de materiais (MRP), continua com procedimentos de carregamento finito e termina com técnicas de input/output para ajudar a acompanhar a execução dos planos.

O primeiro nível do processo de planeamento da capacidade, planeamento dos recursos, engloba o planeamento de longo prazo das instalações fabris e envolve a tradução dos planos de produção em requisitos de capacidade, normalmente em termos agregados ou gerais. O planeamento da produção é a actividade que estabelece o input da produção para a estratégia da empresa e determina o seu papel no plano estratégico aprovado para a empresa [Vollmann, Berry e Whybark, 1984].

O planeamento aproximado da capacidade corresponde ao segundo nível do processo de planeamento da capacidade e tem como fonte de informação o plano director de produção. O plano director de produção é a versão desagregada do plano de produção, isto é, o plano director de produção é uma declaração para a produção dos componentes finais ou opções de produto a serem desenvolvidas no futuro [Vollmann, Berry e Whybark, 1984].

Os requisitos de capacidade de um determinado plano director de produção podem ser estimados por uma das

seguintes técnicas: "Planeamento da Capacidade Utilizando Todos os Factores de Planeamento" (*Capacity Planning Using Overall Planning Factors, CPOF*), "Listas de Capacidade" (*Capacity Bills*) ou "Perfis dos Recursos" (*Resource Profiles*) [Berry, Schmitt e Vollmann, 1982; Vollmann, Berry e Whybark, 1984]. Estas técnicas proporcionam informação que permite modificar os níveis de recursos ou o plano de material no médio prazo para assegurar uma eficiente execução do plano director de produção.

O planeamento mais detalhado dos requisitos de capacidade é possível através da utilização da técnica de "Planeamento dos Requisitos de Capacidade" (*Capacity Requirements Planning, CRP*). Esta técnica foi proposta por Berry, Schmitt e Vollmann [1982] e por Vollmann, Berry e Whybark [1984] para o terceiro nível do processo de planeamento da capacidade igualmente designado Planeamento dos Requisitos de Capacidade. Os planos de material produzidos pelo sistema de planeamento dos requisitos de materiais constituem a base para um planeamento mais detalhado da capacidade, permitindo o cálculo dos requisitos de capacidade período a período. A informação disponibilizada pela técnica *CRP* pode ser utilizada para determinar as necessidades de capacidade de curto prazo tanto em máquinas vitais como em trabalho especializado. O planeamento dos requisitos de materiais (*MRP*) determina, período a período, os planos para todos os componentes e matérias-primas necessárias para produzir todos os produtos do plano director de produção (*MPS*).

O quarto nível do processo de planeamento da capacidade, o carregamento finito, pode ser visto como uma técnica de sequenciamento na fábrica.

O último nível do processo de planeamento da capacidade é a análise input/output através da qual se controla a utilização de capacidade durante a execução dos planos materiais. Esta análise está ligada aos sistemas de execução e à base de dados para o controlo da fábrica. A análise input/output pode indicar a necessidade de actualizar os planos de capacidade à medida que o desempenho da fábrica se afasta dos planos actuais, bem assim como a necessidade de modificar os factores de planeamento utilizados noutras técnicas de planeamento da capacidade.

As técnicas de planeamento da capacidade propostas por Berry, Schmitt e Vollmann [1982] e por Vollmann, Berry e Whybark [1984], "Planeamento da Capacidade Utilizando Todos os Factores de Planeamento" (*Capacity Planning Using Overall Planning Factors, CPOF*), "Listas de Capacidade" (*Capacity Bills*), "Perfis dos Recursos" (*Resource Profiles*) e "Planeamento dos Requisitos de Capacidade" (*Capacity Planning Requirements, CRP*) permitem a conversão de um plano material em requisitos de capacidade. Diferem entre si pelo grau de exactidão, nível de agregação e facilidade de preparação. Vollmann, Berry e Whybark [1984] referiram que à medida que a quantidade de dados e o tempo de cálculo aumentam, a qualidade e detalhe dos requisitos de capacidade melhora.

A utilização de qualquer uma das técnicas de planeamento da capacidade está, contudo, dependente da definição de um plano director de produção para a empresa e consequente elaboração do planeamento dos requisitos de materiais. Esta "dependência" cria uma dificuldade para as empresas que produzem por encomenda, dado que, como referiram Fumero e Vercellis [1994], a grande variedade de produtos que podem ser fabricados dificulta a realização de previsões de procura. Por este motivo a definição do plano director de produção e a consequente elaboração do planeamento de requisitos de materiais torna-se extremamente difícil.

Utilização da Capacidade de Produção

Numa era de intensa concorrência, as empresas preocupam-se, por um lado, em minimizar toda e qualquer fonte de desperdício [Savsar e Al-Jawini, 1995] e, por outro lado, em responder rapidamente às novas solicitações dos clientes, melhorar permanentemente a qualidade dos produtos e a capacidade de entrega [Fortuin, 1988].

Este "novo quadro" onde as empresas desenvolvem a sua actividade revela dois objectivos, aparentemente inconciliáveis, que constituem uma dificuldade para o processo de planeamento da capacidade de produção: (i) minimizar fontes de desperdício significa minimizar a subutilização da capacidade de produção, o que pode gerar pressões para a redução desta e, (ii) uma maior capacidade de resposta às solicitações dos clientes significa ter

capacidade de produção suficiente para lhes dar resposta nos prazos e condições estabelecidas, podendo daqui resultar a necessidade de aumentar a capacidade de produção.

A importância que investigadores e gestores dão à questão da utilização eficiente da capacidade de produção instalada está ilustrada em diversos estudos identificados nesta revisão da literatura.

Bowers e Agarwal [1995] apresentaram o caso de uma empresa produtora de confecções para senhora, que adoptou um sistema de sequenciamento e planeamento da produção de curto prazo. A necessidade de introdução do sistema foi identificada após a verificação de um elevado nível de existências de produtos em vias de fabrico. A empresa em causa, reconhecida no mercado pela qualidade dos seus produtos, estava sujeita a crescentes pressões dos seus clientes mais exigentes. A fim de manter a sua posição no mercado, decidiu adoptar um sistema de sequenciamento e planeamento da produção que lhe permitisse: (i) reduzir o nível de existências de produtos em vias de fabrico e aumentar o número de entregas atempadas; (ii) minimizar o défice da capacidade de produção e, (iii) minimizar a criação de existências de produtos acabados.

Bowers e Agarwal [1995] referiram que a introdução deste novo sistema de sequenciamento e planeamento da produção de curto prazo resultou em diversos benefícios directos e indirectos no prazo de apenas um ano, durante o qual se registou um aumento da procura. Como benefícios directos referiram: (i) a diminuição do nível de existências

de produtos em vias de fabrico em 200.000 dólares; (ii) o aumento das entregas atempadas de 74% para mais de 90% e, (iii) a libertação do responsável pelo planeamento da produção de inúmeras horas não produtivas dedicadas a procurar soluções de sequenciamento por tentativas e aproximações. Os benefícios indirectos foram: (i) maior consideração pelas actividades de planeamento e sequenciamento da produção por parte de todos os participantes e (ii) aquisição de uma compreensão mais completa da generalidade das operações e das restrições de produção e capacidade por parte dos gestores de todos os níveis hierárquicos.

Flanders e Davis [1995] apresentaram o caso de uma empresa que opera um sistema flexível de produção (*FMS*). Depois de analisar alguns indicadores estatísticos de desempenho e estudos anteriores de simulação do sistema, os fabricantes concluíram que este estava a ser subutilizado. A pedido da empresa, Flanders e Davis [1995] definiram um sequenciamento da produção mais eficiente que assegurava a produção diária dos componentes necessários e permitia disponibilizar a capacidade excedentária para a produção de outros componentes.

Flanders e Davis [1995] concluíram: (i) que o trabalho desenvolvido não ajudou os proprietários da empresa, pois, não obstante terem determinado o estrangulamento não encontraram solução para o problema; (ii) o ponto fundamental no sequenciamento do sistema de produção flexível em análise reside na gestão das ferramentas; (iii)

a chegada de componentes e as solicitações da linha de montagem a jusante devem ser consideradas quando o modelo é utilizado; (iv) as variações na procura diária e as situações em que a empresa utiliza as "folgas" para produzir outros componentes devem também ser consideradas, pois a produção de outros componentes irá provavelmente afectar a substituição de ferramentas; (v) sempre que determinadas restrições operacionais não são incluídas no modelo de simulação, este, provavelmente, irá ultrapassar o nível de desempenho esperado e, (vi) qualquer sequenciamento detalhado deve ser feito para o curto prazo.

Sinha et al [1995] apresentaram o caso de uma siderurgia que pretendeu otimizar as suas operações num contexto de escassez de recursos e desequilíbrios de capacidade. Para resolver o problema foi constituído um grupo de trabalho que tinha como tarefa maximizar a contribuição das diversas unidades da empresa para o lucro global, através da optimização da utilização do recurso escasso constituído pela energia eléctrica. A energia eléctrica é um recurso fundamental para o funcionamento desta siderurgia que necessita de uma quantidade mínima de electricidade para manter em funcionamento unidades vitais.

Foi desenvolvido um modelo que tinha como objectivo definir quais as unidades da empresa que deveriam funcionar, dada uma determinada disponibilidade de energia eléctrica, para que fosse possível utilizar essa energia eléctrica do modo mais lucrativo. Os benefícios resultantes da aplicação do modelo foram calculados comparando a contribuição por

mega watt-hora antes e depois da aplicação do modelo. No primeiro ano de aplicação do modelo, os lucros por mega watt-hora aumentaram 73 milhões de dólares. Os autores referem ainda como benefício indirecto da aplicação do modelo a credibilidade e aceitação dos resultados derivados da introdução do modelo de gestão científica e da interacção que os decisores podem ter com o modelo. Referem ainda outros benefícios adicionais resultantes de decisões atempadas baseadas noutras utilizações do modelo, nomeadamente: (i) distribuição óptima do oxigénio escasso durante as falhas de fornecimento de oxigénio; (ii) distribuição óptima de metal quente durante as falhas do alto-forno; (iii) a instalação de unidades geradoras a *diesel*, baseada na sua contribuição marginal de energia; (iv) a aquisição de sobras durante as falhas de metal quente de acordo com os preços de equilíbrio e quantidades revelados pelo modelo e, (v) determinação dos níveis óptimos de conversão de produtos semi-acabados em aço pronto por outras empresas.

Na secção seguinte abordaremos o problema do sequenciamento da produção por encomenda.

O Sequenciamento da Produção por Encomenda

O sequenciamento da produção tem como objectivo ordenar as operações a serem executadas em cada máquina, tendo em atenção as restrições de rotas e da fábrica, com vista a otimizar uma determinada medida de desempenho [Koh, Souza e Ho, 1995]. Koh, Souza e Ho [1995] referiram que o problema

do sequenciamento da produção por encomenda é complexo, tendo em atenção a necessidade de equilibrar vários objectivos, alguns deles incompatíveis, nomeadamente: datas de conclusão, restrições de custos, nível de produção, capacidade da máquina, rotas alternativas, características da encomenda e características e disponibilidade de recursos. McKay, Safayeni e Buzacott [1988] referiram que o problema do sequenciamento, investigado desde a década de 50, pode ser definido como um processo que procura sequenciar as ordens de fabrico e enviá-las para produção de tal forma que sejam satisfeitos vários objectivos, utilizando informação que é possivelmente incompleta, ambígua, enviesada, desactualizada e errada.

Apresentamos a seguir alguns modelos e técnicas propostos para o processo de sequenciamento da produção por encomenda.

Kanet e Hayya [1982] procuraram determinar se a vigilância das datas de conclusão das operações permitia melhorar o desempenho da fábrica relativamente ao cumprimento das datas de conclusão das encomendas. As regras de prioridade que são função da data de conclusão da encomenda podem ser divididas em duas classes: a das que requerem o estabelecimento e manutenção de datas de conclusão para cada operação da encomenda e a das que não requerem. A lógica para fixar datas de conclusão para as operações é que, presumivelmente, aumenta o nível de cumprimento da data de conclusão da encomenda pelo estabelecimento e esforço dispensado para fixar "marcos" no

fluxo das encomendas na fábrica [Kanet e Hayya, 1982]. Estes autores referiram que a introdução de datas de conclusão para as operações significa que, de algum modo, o sistema de sequenciamento deve usar a data de conclusão da encomenda e, inteligentemente, planejar as datas de conclusão para cada operação da encomenda. A definição de datas de conclusão para cada operação implica a determinação da rota a seguir pela encomenda bem como a realização de uma estimativa relativamente ao tempo de processamento em cada máquina visitada pela encomenda. Contudo, a decisão de estabelecer e manter datas de conclusão da operação não está isenta de custos, além de adicionar complexidade ao sistema de sequenciamento.

Para verificar se o estabelecimento de datas de conclusão para as operações permitia melhorar o desempenho da fábrica relativamente ao cumprimento das datas de conclusão das encomendas, Kanet e Hayya [1982] compararam três regras fundamentais de sequenciamento das encomendas com as suas equivalentes em termos de operações. As regras comparadas foram: (i) *Earliest Job Due Date* (DDATE) versus *Earliest Operation Due Date* (OPNDD); (ii) *Smallest Job Slack* (SLACK) versus *Smallest Operation Slack* (OPSLK) e, (iii) *Critical Ratio* (CR) versus *Operation Critical Ratio* (OPCR). As comparações foram efectuadas através da realização de um modelo de simulação de uma fábrica.

Da revisão da literatura feita, Kanet e Hayya [1982] destacaram dois aspectos importantes: (i) a forma como são

fixadas as datas de conclusão e, (ii) o nível de dificuldade de cumprimento das datas de conclusão.

O primeiro aspecto, a forma como são fixadas as datas de conclusão, envolve os métodos para fixar as datas de conclusão da encomenda e os métodos para fixar as datas de conclusão de cada operação. Atribuir uma data de conclusão a uma encomenda é equivalente a atribuir uma tolerância para o fluxo da encomenda na fábrica. Kanet e Hayya [1982] referiram que Conway estudou vários métodos para fixar tolerâncias para o fluxo das encomendas, tendo verificado que o melhor método é o que fixa a tolerância do fluxo da encomenda proporcionalmente ao tempo total de processamento da encomenda. Por outro lado, Kanet e Hayya [1982] referiram também que Orkin estudou vários métodos para atribuir tolerâncias para o fluxo das operações de uma encomenda, com base no método de Conway, tendo constatado que o melhor método é o que atribui as tolerâncias dos fluxos das operações em proporção ao tempo de processamento da operação. Kanet e Hayya [1982] atribuíram as tolerâncias de acordo com os métodos que Conway e Orkin consideraram como sendo os melhores, isto é: (a) a tolerância para o fluxo da encomenda i na operação j é igual ao tempo de processamento necessário para concluir a encomenda multiplicado por um múltiplo de tolerância k e (b) a tolerância total para o fluxo da encomenda i é igual ao somatório das tolerâncias para o fluxo da encomenda i em cada operação.

O segundo aspecto, o nível de dificuldade em cumprir as datas de conclusão, é controlado pelo múltiplo de tolerância

k. O desempenho relativo das regras de prioridade pode variar com a tolerância média para o fluxo da encomenda. Kanet e Hayya [1982] realizaram experiências com três níveis diferentes de tolerância média. Os três valores utilizados, $k=5,14$, $k=7,71$ e $k=10,28$, são consistentes com os utilizados em outros estudos e são representativos dos valores encontrados em ambientes industriais.

Os resultados do estudo de Kanet e Hayya [1982] indicaram que o estabelecimento de datas de conclusão para as operações melhora qualquer medida de desempenho da fábrica com relação à data de conclusão e reduz as existências de produtos em vias de fabrico.

Baker [1984] analisou os aspectos tácticos da interacção existente entre as prioridades de sequenciamento e o método de estabelecimento de datas de conclusão, dando particular atenção ao atraso médio como medida de eficácia do sequenciamento. Baker [1984] refere que os objectivos do sequenciamento são frequentemente multidimensionais e que existem diversas medidas possíveis para medir o seu desempenho. Há, contudo, dois factores relevantes: tempo na fábrica (*shop time*) e o desempenho no cumprimento da data de conclusão. O tempo de uma encomenda na fábrica, desde o seu lançamento até à sua conclusão, é designado por *flowtime*. O *mean job flowtime* é uma medida fundamental do desempenho da fábrica relativamente à capacidade de satisfação de encomendas e é, por isso, frequentemente utilizado como um indicador de sucesso da capacidade de resposta rápida aos

clientes. O *mean job flowtime* é também uma medida do nível médio de produtos em vias de fabrico.

Baker [1984] referiu que, na realidade, nas fábricas, o cumprimento das datas de conclusão tende a ser um critério mais importante do que a minimização do tempo na fábrica, apesar de o estudo do desempenho no cumprimento das datas de conclusão ser mais complicado. Por um lado, não existe uma medida única, universalmente aceite, de eficiência nesta dimensão. Um sequenciamento que cumpra todas as datas de conclusão é bom. Porém, quando se torna impossível atingir este nível de perfeição, como quantificar o "melhor" nível de desempenho? A literatura sobre o assunto sugere várias respostas, nomeadamente a "proporção de encomendas atrasadas" (*proportion of late jobs*), o "atraso médio de todas as encomendas" (*mean tardiness among all jobs*) e o "atraso médio condicional" (*conditional mean tardiness*), isto é, o atraso médio medido apenas em relação às encomendas atrasadas. Por outro lado, há uma outra complicação que está relacionada com o facto de não haver uma única regra de prioridade que seja melhor que todas as outras, contrariamente ao que ocorre com o *mean flowtime*. As regras que apresentam melhores desempenhos são aquelas que se baseiam na informação sobre a data de conclusão para determinar a urgência da encomenda, ainda que em determinadas circunstâncias a regra *Shortest Processing Time* (SPT) seja eficaz em virtude da sua capacidade para acelerar o processamento da maior parte das encomendas na fábrica.

Ainda segundo Baker [1984], os investigadores têm sugerido três abordagens para determinar prioridades utilizando a informação da data de conclusão: (i) prioridades baseadas na tolerância; (ii) prioridades baseadas na folga e, (iii) prioridades baseadas num rácio. A tolerância do fluxo de uma encomenda é o intervalo de tempo entre o lançamento da encomenda e a sua data de conclusão. A regra mais simples, baseada na tolerância da encomenda é a *Earliest Due Date* (EDD). O tempo de folga de uma encomenda é obtido subtraindo à tolerância do fluxo da encomenda o tempo necessário para executar essa encomenda. Neste caso, a regra normalmente utilizada é a *Minimum Slack Time* (MST). A definição de prioridades com base em rácios é feita a partir do cálculo de um quociente entre o tempo de tolerância do fluxo de uma encomenda e o respectivo tempo de processamento, sendo a regra normalmente utilizada a *Smallest Critical Ratio* (SCR).

Um outro factor na medição da urgência da encomenda é o número de operações remanescentes. Quando duas encomendas têm a mesma tolerância remanescente e o mesmo tempo de processamento remanescente, a encomenda com o maior número de operações é intuitivamente mais urgente, porque se defronta com mais possibilidades de atraso. Este raciocínio conduziu à elaboração dos índices de prioridade baseados na "tolerância remanescente por operação" (*Remaining Allowance per Operation*, A/OPN) ou "folga por operação" (*Slack per Operation*, S/OPN).

Uma outra forma de reconhecer o número de operações remanescentes é a utilização de "marcos" para as operações. Depois de se atribuir a data de conclusão da encomenda, definem-se "marcos" para assinalar quando é que cada operação deve estar concluída num cenário em que a encomenda progride regularmente até estar concluída. Estes "marcos" são designados "datas de conclusão das operações" (*Operation Due-Dates*) e dividem a tolerância do fluxo de uma encomenda em tantas partes quantas as operações que a constituem. Neste caso, a abordagem baseada na tolerância permite o estabelecimento da regra *Earliest Operation Due-Date* (ODD); a abordagem baseada na folga permite o estabelecimento da regra *Minimum Operation Slack Time* (OST) e a abordagem baseada no rácio permite o estabelecimento da regra *Smallest Operation Critical Ratio* (OCR).

Baker [1984] seleccionou resultados apresentados por diversos investigadores, que utilizaram algumas das regras referidas (SPT, EDD, MST, SCR, A/OPN, S/OPN, ODD, OST e OCR), e comparou o desempenho de cada uma dessas regras relativamente a três medidas de desempenho: "atraso médio" (*mean tardiness*, MT), "proporção de encomendas atrasadas" (*proportion of jobs tardy*, PT) e "atraso médio condicional" (*conditional mean tardiness*, CMT). Baker [1984] advertiu para a necessidade de ter alguns cuidados na interpretação dos estudos seleccionados, uma vez que: (i) se utilizaram diferentes condições experimentais nos estudos seleccionados, o que pode ser importante para a compreensão de algumas conclusões contraditórias e, (ii) as regras

seleccionadas são as mais simples, tendo sido ignoradas as que envolvam um parâmetro adicional.

Contudo, mesmo tendo em conta os cuidados referidos e o facto de que os resultados seleccionados foram ligeiramente simplificados, Baker [1984] destacou as seguintes conclusões: (i) para a medida de desempenho "proporção de encomendas atrasadas" a regra SPT é, consistentemente, muito eficaz; (ii) para a medida "atraso médio condicional" as prioridades baseadas nos rácios são eficazes e, (iii) para a medida "atraso médio" os resultados não são claros.

Para se compreender porque é que os resultados não são claros para a medida "atraso médio" é necessário: (i) levar em consideração que a reduzida tolerância da data de conclusão afecta o cumprimento da data de conclusão; (ii) observar que podem ser utilizadas várias regras de decisão para fixar datas de conclusão, nomeadamente *Constant flow allowances* (CON), *Equal slack* (SLK), *Proportional to number of operations* (NOP), *Processing plus waiting time* (PPW) e *Proportional to total work* (TWK) e, (iii) notar que existem diversas alternativas para fixar datas de conclusão para as operações, nomeadamente, CON, SLK e TWK.

Os resultados da simulação [Baker, 1984] orientada para a análise do atraso médio permitiram concluir que: (i) o desempenho medido pelo atraso médio varia consoante a maior ou menor tolerância da data de conclusão e a inclinação da curva do atraso médio depende da regra de prioridade utilizada; (ii) a regra SPT é relativamente eficaz quando as datas de conclusão são bastante rígidas, o mesmo não se

passando quando as datas são flexíveis; (iii) a regra "*Modified Operation Due-Date* (MOD)" estabelece um desempenho superior relativamente ao atraso médio e está muito próxima das melhores regras quando as datas são flexíveis; (iv) como princípio geral, as regras de prioridade orientadas para as operações apresentam melhores resultados no critério "atraso médio" que as regras orientadas para as encomendas e, (v) de uma maneira geral, as regras baseadas na folga não oferecem vantagem face às regras baseadas na tolerância.

Weeks [1979] investigou a atribuição de datas de conclusão exequíveis ou previsíveis numa fábrica com hipotéticas restrições de mão-de-obra e de máquinas, com dimensão e estrutura diferentes. A determinação de datas de conclusão exequíveis depende do *flowtime* previsto para a encomenda, o qual é função do tempo necessário para processar a encomenda e do atraso esperado para a encomenda. Investigações anteriores indicam que o atraso da encomenda depende dos procedimentos de lançamento da produção e de afectação de mão-de-obra utilizados, da estrutura e do congestionamento da fábrica.

Weeks [1979] utilizou três critérios para medir o desempenho da fábrica no seu modelo experimental: "atraso médio" (*mean lateness*), "antecipação média" (*mean earliness*) e "média das datas de conclusão não satisfeitas" (*mean missed due-dates*). O "atraso médio" é definido como o valor médio absoluto das diferenças positivas entre o *flowtime* das encomendas e as datas de conclusão; a "antecipação média" é definida como o valor médio absoluto das diferenças

negativas entre o *flowtime* das encomendas e as datas de conclusão; a "média das datas de conclusão não satisfeitas" é definida como o valor médio absoluto das diferenças negativas e positivas entre o *flowtime* das encomendas e as datas de conclusão. Assim, a "média das datas de conclusão não satisfeitas" é igual à soma do "atraso médio" e da "antecipação média" e representa uma estrutura de critérios onde a antecipação e o atraso da encomenda têm pesos relativos iguais. O modelo considerava três sistemas de produção, duas regras de sequenciamento das encomendas e sete regras para definição das datas de conclusão. As regras de sequenciamento utilizadas foram a *Shortest Imminent Processing Time* (SIPT) e a *Least Slack per Remaining Operation* (LSRO). A SIPT selecciona as encomendas com o menor tempo de processamento na operação imediatamente a seguir; a LSRO selecciona as encomendas que apresentam o menor rácio calculado a partir do quociente entre o tempo de tolerância do fluxo da encomenda e o respectivo número de operações remanescentes. Das regras de definição das datas de conclusão, três utilizavam informação sobre o conteúdo da encomenda, outras três utilizavam estimativas sobre o *mean job flowtime* e *mean job delay time* e a última regra incluía informação sobre o estado de congestionamento da fábrica.

A análise da variância dos resultados [Weeks, 1979] indicou que o procedimento de definição da data de conclusão da encomenda, a regra de sequenciamento e a estrutura da fábrica afectam o seu desempenho em relação ao cumprimento das datas de conclusão. Os resultados indicaram também que

os gestores devem acompanhar o nível de congestionamento existente na fábrica e o *job flowtime* para definir datas de conclusão exequíveis com base nas estimativas condicionais do *job flowtime*.

Vepsalainen e Morton [1987] referiram que o cumprimento das datas de conclusão e a minimização das penalizações por atraso são os objectivos mais importantes do sequenciamento. No entanto, os custos inerentes às encomendas atrasadas, como má impressão causada ao cliente, perda de vendas futuras e custos extra com a expedição das encomendas variam significativamente com os clientes e as encomendas. Por este motivo, Vepsalainen e Morton [1987] defenderam a introdução de uma "peso estratégico" na definição da prioridade da encomenda. As regras normalmente utilizadas, como *Earliest Due Date* (EDD), *Minimum Slack* (MSLACK), *Slack per Remaining Processing Time* (S/RPT) e *Shortest Processing Time* (SPT), além de apresentarem algumas deficiências em determinadas condições, por exemplo em relação aos níveis de trabalho da fábrica, atribuem "pesos" iguais a todas as encomendas.

Vepsalainen e Morton [1987] compararam o desempenho de duas regras de sequenciamento, a COVERT ponderada e a "Nova *Apparent Tardiness Cost*" ("Nova ATC"), com outras regras conhecidas: *First Come, First Served* (FCFS), *Earliest Due Date* (EDD), *Slack per Remaining Processing Time* (S/RPT) e *Weighted Shortest Processing Time* (WSPT). A regra FCFS processa as encomendas segundo a ordem de chegada; a regra EDD selecciona primeiro as encomendas com a data de conclusão mais próxima; a regra S/RPT selecciona em primeiro

lugar as encomendas com menor folga em relação ao tempo de processamento; a regra WSPT determina o quociente entre a penalização pelo atraso da encomenda e o seu tempo de processamento, seleccionando as encomendas por ordem decrescente do valor do rácio.

A regra COVERT foi desenvolvida por Carroll para o sequenciamento com atraso médio e para incorporar o "peso" das encomendas numa abordagem baseada na folga. O índice de prioridade COVERT representa o custo esperado do atraso por unidade de tempo de processamento iminente, ou *Cost OVER Time*. Para a encomenda i , em fila de espera para a operação j com folga zero ou negativa, $S_{ij}(t) < 0$, prevê-se um atraso na conclusão com um custo esperado do atraso de v_i (inicialmente normalizado para 1) e o índice de prioridade v_i/p_{ij} (p_{ij} = tempo de processamento da operação j da encomenda i) Se a folga exceder o "pior caso" de estimativa de tempo de espera, o custo do atraso esperado é fixado em zero. O "pior caso" de tempo de espera serve de referência para determinar o custo do atraso esperado em relação à folga S_{ij} :

$$COVERT_{ij}(t) = \frac{v_i}{p_{ij}} \frac{\left[k \sum_{q=j}^{m_i} W_{iq} - (S_{ij})^+ \right]}{k \sum_{q=j}^{m_i} W_{iq}}$$

Neste caso W_{iq} é o tempo de espera previsto para a operação remanescente q , e k é um multiplicador que ajusta o tempo de espera previsto para o "pior caso". O tempo de espera remanescente é muitas vezes a soma dos vários tempos de espera das operações, e a simetria da distribuição sugere

que o "pior caso" é cerca do dobro da média, ou seja $k=2$. A regra COVERT ponderada, utilizada por Vepsalainen e Morton [1987] combina os efeitos das regras *Weighted Shortest Processing Time* (WSPT) e *Slack per Remaining Processing Time* (S/RPT) com a informação prevista do *leadtime*:

$$COVERT_{ij}(t) = \frac{v_i}{p_{ij}} \left[1 - \frac{\left(d_i - t - \sum_{q=j}^{mi} p_{iq} \right)^+}{k \sum_{q=j}^{mi} W_{iq}} \right]^+$$

onde:

d_i - data de conclusão;

t - momento actual.

A regra ATC foi desenvolvida por Rachamadugu e Morton para o problema do atraso ponderado. Partindo de um sequenciamento óptimo, inicialmente para uma máquina apenas, utilizaram *pairwise interchange* para demonstrar que para a encomenda i passar à frente da encomenda j no momento t , é necessário que o custo marginal satisfaça a seguinte condição:

$$v_i [t + p_i - d_i]^+ + v_j [t + p_i + p_j - d_j]^+ < v_i [t + p_j + p_i - d_i]^+ + v_j [t + p_j - d_j]^+$$

onde:

v - custo esperado do atraso;

t - momento actual;

p - tempo de processamento da encomenda;

d - data de conclusão;

i, j - encomenda.

Para desenvolver um índice de prioridade a equação anterior é reescrita da seguinte forma:

$$\frac{v_i}{p_i} - \frac{[p_j - (d_i - p_i - t)^+]^+}{p_j} > \frac{v_j}{p_j} - \frac{[p_i - (d_j - p_j - t)^+]^+}{p_i}$$

Agora o índice tem uma forma familiar: o máximo de v_i/p_i para uma encomenda crítica e menos se existe folga. Mas em vez de trocar a folga da encomenda i pelo tempo de processamento da encomenda j , e vice-versa, deve utilizar-se uma referência. Foi proposta a substituição de p_j no índice i por um factor kp , ou o tempo médio de processamento das encomendas em espera, p , multiplicado por um factor previsional k , relacionado com o número de encomendas concorrentes críticas e "quase-críticas". Mas em vez de utilizar uma função linear, a inversa da tolerância é, de facto, mais próxima do "custo aparente" do atraso subentendido pela prioridade de equilíbrio das encomendas atrasadas com os tempos de processamento que excedem a folga. Assim, o índice de prioridade ATC vem:

$$ATC(t) = \frac{v_i}{p_i} \exp\left(-\frac{[d_i - p_i - t]^+}{kp}\right)$$

O k é um parâmetro de previsão que escala a folga, medida em unidades de tempo médio de processamento, de acordo com o número esperado de encomendas concorrentes. Normalmente utiliza-se o valor fixo de $k=2$ em *flow shops* estáticos e em estudos com uma máquina, e $k=3$ é um valor razoável para *job shops* dinâmicos. Vepsalainen e Morton [1987] propuseram uma versão modificada da regra ATC a que chamaram "nova ATC" que determina a prioridade por comparação com as encomendas concorrentes, coordenando trocas com base na data de conclusão das operações definidas por:

$$d_{ij} = d_i - \sum_{q=j+1}^{m_i} (W_{iq} + p_{iq})$$

onde:

d_{ij} - data de conclusão da operação j da encomenda i ;

d_i - data de conclusão da encomenda i ;

$w_{iq}+p_{iq}$ - estimativa do tempo subsequente.

Os resultados indicaram [Vepsalainen e Morton, 1987] que a regra "nova ATC" se superiorizou a todas as outras nas várias situações de carga da fábrica estudadas. A regra "nova ATC" apresentou resultados superiores para o critério "atraso ponderado médio". A regra COVERT ponderada aparece em segundo lugar, ainda que os resultados não sejam tão consistentes em relação ao número de encomendas atrasadas. Qualquer uma destas duas regras teve um bom desempenho em relação aos produtos em vias de fabrico e aos custos de posse de existências.

Na secção seguinte analisaremos o problema do sequenciamento das actividades com restrições de recursos.

O Sequenciamento das Actividades com Restrições de Recursos

Pritsker, Watters e Wolfe [1969] referiram-se a um problema de sequenciamento em que se pretende determinar quando deve ser processado uma determinada encomenda, tendo em atenção restrições de recursos como por exemplo mão-de-obra, equipamento e instalações fabris. Roy e Meikle [1995] referiram que o problema básico do sequenciamento pode ser descrito como o da afectação dos recursos disponíveis para um determinado número de encomendas, durante um determinado período de tempo, por forma a cumprir objectivos específicos do negócio. Goldratt e Fox citados por Roy e Meikle [1995] descreveram os objectivos fundamentais de um negócio como sendo a maximização das vendas e a minimização dos custos de existências e de outros custos operacionais. Roy e Meikle [1995] por seu turno referiram que um sistema de sequenciamento deve contribuir para aqueles objectivos pela promoção da competitividade da empresa através da melhoria da capacidade de entrega e da utilização eficiente dos recursos por forma a aumentar as vendas, minimizando as despesas operacionais e os níveis de inventário.

Para Nkasu [1994], o problema do sequenciamento com restrições de recursos é representativo de uma classe de problemas combinatoriais, como o sequenciamento da produção em *job shop*, o planeamento e controlo da produção e o equilíbrio de linhas de montagem, os quais são

caracterizados por um crescimento factorial na quantidade de cálculos necessários para considerar todas as soluções possíveis, à medida que a interacção entre os parâmetros do sistema aumenta. Jeffcoat e Bulfin [1993], por seu turno, referiram que a investigação sobre problemas de sequenciamento com restrições de recursos tem incidido em problemas simples com uma só máquina, em casos especiais e em problemas de sequenciamento de projectos.

Os métodos e regras que analisamos a seguir estão relacionados com o problema do sequenciamento das actividades de um projecto, com restrições de recursos. No entanto, alguns desses métodos e regras podem ser aplicados ao problema do sequenciamento da produção por encomenda. Serafini e Speranza [1994] referiram que o problema do sequenciamento de um projecto com restrições de recursos está fortemente relacionado com o problema da produção por encomenda. Cooper [1976] referiu não apenas os métodos exactos propostos para sequenciar projectos com recursos limitados com vista à minimização do tempo de conclusão, como também os problemas de sequenciamento do *job shop* e de equilíbrio de linhas de montagem que daí resultam. Demeulemeester e Herroelen [1992] referiram que o problema do sequenciamento das actividades de um projecto com restrições de recursos é uma generalização do problema do sequenciamento da produção por encomenda e, como tal, é um problema do tipo *NP-complete*. Fumero e Vercellis [1994] referiram a aplicação dos meios e ferramentas da gestão de

projectos à gestão da produção por encomenda, tendo em conta as semelhanças existentes entre uma e outra.

O problema do sequenciamento das actividades de um projecto com restrições de recursos tem várias versões. Pode ser caracterizado pelo número de projectos sequenciados em simultâneo (um ou vários), pela função objectivo e pelas características dos recursos e condições de utilização prioritária, entre outras [Lee e Kim, 1996]. A forma básica do problema tem como objectivo sequenciar as actividades de um projecto de tal forma que não sejam violadas as restrições de recursos e sejam consideradas as relações de precedência existentes entre as actividades, com o objectivo de minimizar a duração do projecto [Oguz e Bala, 1994].

A minimização da duração do projecto é frequentemente utilizada como objectivo do problema de sequenciamento [Cooper, 1976; Davis e Heidorn, 1971; Davis e Patterson, 1975; Nkasu, 1994; Pritsker, Watters e Wolfe, 1969]. Com menos frequência, surgem outros objectivos, nomeadamente: minimização do custo financeiro dos recursos [Nkasu, 1994], minimização dos inevitáveis atrasos dos projectos, maximização da utilização dos recursos e redução da interrupção da utilização dos recursos [Lorterapong, 1994], minimização do *makespan*, minimização do atraso total ou da penalização por atraso, cumprimento dos tempos de conclusão da encomenda e cumprimento dos tempos de conclusão do projecto [Pritsker, Watters e Wolfe, 1969].

As técnicas de resolução de problemas de sequenciamento das actividades com restrições de recursos que podem ser

divididas em duas categorias [Lorterapong, 1994; Oguz e Bala, 1994]:

- Heurísticas - não garantem a obtenção de uma solução óptima, mas fornecem, num espaço de tempo razoável e a um custo aceitável, uma boa solução para problemas práticos.
- Modelos de Optimização - obtêm soluções óptimas, formulando e resolvendo o problema como um programa matemático.

Nas secções seguintes apresentaremos algumas heurísticas e modelos de optimização utilizados na resolução do problema do sequenciamento das actividades com restrições de recursos.

O Sequenciamento das Actividades com Restrições de Recursos

Utilizando Heurísticas

Davis e Paterson [1975] analisaram e compararam os resultados da aplicação de oito regras heurísticas de sequenciamento das actividades de um projecto com restrições de recursos, avaliando-as em relação à duração do projecto. Segundo estes autores, o problema da restrição de recursos surge quando estes estão disponíveis em quantidades fixas e a sua procura por parte de actividades concorrentes não pode ser satisfeita.

Foram analisadas as seguintes regras de sequenciamento de actividades: *Minimum Job Slack* (MINSLK), *Resource Scheduling Method* (RSM), *Minimum Late Finish Time* (LFT), *Greatest Resource Demand* (GRD), *Greatest Resource*

Utilization (GRU), *Shortest Imminent Operation* (SIO), *Most Jobs Possible* (MJP) e *Selects Jobs Randomly* (RAN). A regra MINSLK dá prioridade à actividade com a menor "folga", sendo esta calculada pela diferença entre o tempo mais tardio de início e o tempo mais cedo de início da actividade determinado pela análise do caminho crítico. A regra RSM dá prioridade à actividade com o menor valor d_{ij} , que é o máximo de $[0; (EFT_i - LST_j)]$, onde:

d_{ij} = aumento resultante na duração do projecto quando a actividade j sucede à actividade i ;

EFT_i - tempo mais cedo de conclusão da actividade i ;

LST_j - tempo mais tardio de início da actividade j .

A regra *Minimum LFT* dá prioridade às actividades com o menor tempo mais tardio de conclusão tal como determinado pelos métodos tradicionais do caminho crítico. A regra GRD atribui a prioridade com base no total de requisitos de recursos de todos os tipos, dando prioridade à actividade com maior necessidade de recursos. A prioridade da actividade é calculada da seguinte forma:

$$\text{prioridade} = d_j \sum_{i=1}^m r_{ij}$$

d_j - duração da actividade j ;

r_{ij} - requisitos da actividade j , por período, do recurso i ;

m - número de diferentes tipos de recursos.

A regra GRU dá prioridade à combinação de actividades que resulta na utilização máxima de recursos em cada intervalo de sequenciamento (isto é, o mínimo de recursos

inactivos). Esta regra é implementada através da resolução de um problema de programação inteira zero-um. A regra SIO atribui a prioridade com base na duração da actividade, seleccionando, em primeiro lugar, a actividade com menor tempo de duração. A regra MJP dá prioridade à combinação de actividades que resulta no maior número de actividades sequenciadas em qualquer intervalo. É implementada também através da resolução de um problema de programação inteira zero-um. A heurística RAN atribui prioridade entre as actividades concorrentes numa base puramente aleatória.

Davis e Paterson [1975] concluíram que nenhuma das oito regras heurísticas testadas desempenhou consistentemente melhor nos 83 problemas analisados, embora a regra MINSLK tivesse gerado soluções óptimas mais frequentemente e revelado o mais baixo aumento médio da duração do projecto acima do óptimo no conjunto das regras examinadas. As regras RSM e LFT são aquelas cujo desempenho mais se aproximou do da regra MINSLK.

Nkasu [1994] apresentou uma nova metodologia heurística iterativa de sequenciamento designada COMSARS (COMputer Sequencing Approach to **M**ulti-Resource Constrained Scheduling). Esta metodologia foi desenvolvida para responder a problemas de planeamento e sequenciamento das actividades de um projecto, onde a disponibilidade de vários recursos é limitada.

A metodologia COMSARS selecciona, aleatoriamente, as actividades do projecto, executando o sequenciamento das actividades de acordo com as restrições de precedência

pré-determinadas e a disponibilidade de recursos. Através de um processo iterativo, vão sendo feitas sucessivas melhorias no tempo de conclusão do projecto, com o recurso à simulação de Monte Carlo e à possibilidade de seleccionar recursos alternativos tão cedo quanto se tornem disponíveis. O processo termina quando não for possível efectuar mais melhorias no tempo de conclusão do projecto.

A aplicação desta metodologia exige que o gestor de projecto identifique a lista de actividades a efectuar no projecto, as relações de precedência existentes, o tempo previsto para cada actividade e os respectivos requisitos de recursos, bem como as disponibilidades de cada um dos recursos utilizados [Nkasu, 1994].

A eficiência da metodologia COMSARS foi avaliada num caso de construção de instalações de armazenagem, envolvendo trinta e seis actividades e seis tipos diferentes de recursos, com níveis distintos de restrições. Os resultados obtidos permitem prever a procura futura de recursos e ajuizar do momento em que determinados recursos caros e/ou escassos deverão ser adquiridos ou dispensados, contribuindo assim para a redução de custos na execução do projecto.

Lorterapong [1994] propôs uma nova técnica com base na teoria dos conjuntos difusos para afectação de recursos às actividades de um projecto. Ao contrário do que sucede com os métodos tradicionais de afectação de recursos, a técnica proposta por Lorterapong [1994] investiga as consequências de cada afectação na duração global do projecto antes de qualquer decisão de sequenciamento ser feita. Além disso,

esta técnica incorpora uma abordagem mais directa e natural para modelar as incertezas associadas ao conhecimento temporal na rede do projecto. Os recursos são afectos às actividades de um projecto de tal forma que: (i) minimizem os inevitáveis atrasos dos projectos; (ii) utilizem os recursos tanto quanto possível e, (iii) sejam reduzidas as interrupções de utilização dos recursos. A aplicação desta técnica é desenvolvida em duas fases: formação de grupos e avaliação de grupos.

A formação de grupos tem lugar sempre que ocorre uma disputa de recursos por parte das actividades do projecto. Estas actividades são então utilizadas para a criação de todos os grupos ou subgrupos possíveis de actividades. A referida disputa pode ter lugar no âmbito de um único projecto ou entre projectos.

Seja X_1 um conjunto constituído por quatro actividades - A, B, C, D - que disputam os mesmos recursos. Com base neste conjunto de quatro actividades que constitui o nível um, o do topo, de uma hierarquia de desagregação, determinam-se todos os subconjuntos possíveis de três actividades. Estes subconjuntos constituirão o nível dois, imediatamente inferior, daquela hierarquia. São quatro os subconjuntos de três actividades que se podem obter com as quatro actividades iniciais - ABC, ABD, BCD, ACD. Admitamos que o primeiro e o último - ABC e ACD - constituem subconjuntos exequíveis, isto é, podem ser sequenciados sem que, considerando a disponibilidade de recursos no momento, criem conflito de recursos. Tratando-se de subconjuntos exequíveis

dispensam qualquer desagregação em subconjuntos de duas actividades no nível três. Assim, teremos tão somente de proceder à desagregação dos subconjuntos não exequíveis em subconjuntos de duas actividades.

Dos subconjuntos não exequíveis - ABD e BCD - obtemos os seguintes subconjuntos de duas actividades, respectivamente: AB, AD, BD e BC, BD, CD. Dos subconjuntos de duas actividades assim criados são liminarmente excluídos de mais consideração aqueles que são parte de qualquer subconjunto de três do nível superior imediatamente anterior. Assim, ficam eliminados os subconjuntos AB e BC por serem parte do anterior conjunto exequível do nível dois, ABC, bem como os subconjuntos AD e CD por serem parte do anterior subconjunto ACD. Resta o conjunto que, após análise do projecto, se revela ser exequível. O processo de desagregação termina quando forem identificados todos os subconjuntos exequíveis.

Uma vez os grupos formados, procede-se à avaliação do mérito dos subconjuntos de actividades exequíveis, isto é, das que não criam conflito na utilização dos recursos. Para esta avaliação são apresentados três novos termos: tempo actual (*Current Time*, CT); grelha de tempo imediata (*Next Time Frame*, NTF); folga total remanescente (*Remaining Total Float*, RFT). CT é definido como o instante da ocorrência do conflito; a NTF aplica-se aos subconjuntos formados na fase anterior e define-se como o instante mais cedo possível após CT em que uma nova decisão acerca de afectação de recursos é necessária; a RFT é calculada para as actividades não

incluídas no subconjunto exequível formado na primeira fase e para a qual se calcula a NTF. A RTF de uma actividade k denota, quando negativa, o atraso no projecto causado pelo adiamento de k ; quando é positiva expressa o montante da folga total remanescente nas actividades sucessoras de k .

Lorterapong [1994] comparou o desempenho da técnica proposta com o de outras duas regras heurísticas, *Minimum Late Finish* e *Minimum Slack*. Em todas as medidas de desempenho utilizadas - duração do projecto, utilização dos recursos e interrupção de utilização dos recursos - a técnica proposta baseada na teoria dos conjuntos difusos apresentou melhores resultados.

Cooper [1976] comparou o desempenho de duas classes de procedimentos heurísticos de sequenciamento em contexto de restrições múltiplas de recursos, o Método Paralelo e o Método da Amostragem. Estes dois métodos são aplicados no escalonamento de projectos com o objectivo de minimizar a sua duração. Os projectos estão sujeitos a restrições de precedência entre as actividades; à impossibilidade de interrupção da execução da actividade depois de iniciada e à existência de recursos em quantidade limitada.

Os métodos paralelos criam calendários de execução de actividades (encomendas) através de uma série de calendários parciais segundo um processo iterativo. A actividade (encomenda) a ser executada é a que tem a mais elevada prioridade $P(i)$ determinada de acordo com uma regra de prioridade.

Os métodos de amostragem também utilizam um processo iterativo para criar calendários exequíveis com o recurso a técnicas aleatórias.

Cooper [1976] examinou o método paralelo através de uma experiência factorial em 32 projectos utilizando 26 regras de prioridade. Os resultados da análise da variância revelaram que a regra de prioridade utilizada tem um efeito significativo nos calendários obtidos, bem como um efeito de interacção entre as regras de prioridade e cada um dos parâmetros do projecto - estrutura, propriedades da duração do projecto e dos recursos. Para o método de amostragem Cooper [1976] utilizou oito projectos e catorze regras de prioridade. Neste caso os resultados da análise de variância não revelaram nenhum efeito significativo da regra de prioridade utilizada ou de interacções nos calendários obtidos.

A comparação dos dois métodos revelou que o Método Paralelo [Cooper, 1976] é simples de utilizar e mais económico em termos de cálculos, sendo os resultados influenciados pela regra de prioridade utilizada para ordenar as actividades.

O Sequenciamento das Actividades com Restrições de Recursos

Utilizando Modelos de Optimização

Pritsker, Watters e Wolfe [1969] apresentaram a formulação da programação linear do tipo zero-um para problemas de sequenciamento de multi-projectos e produção por encomenda. Os problemas de sequenciamento considerados

por estes autores envolvem a determinação do momento em que determinada encomenda deve ser processada, tendo em atenção a existência de restrições de recursos, como por exemplo mão-de-obra, equipamentos e instalações fabris. Os autores referem ainda que uma encomenda é parte de um projecto, isto é, um projecto é constituído por um conjunto de encomendas.

O modelo referido por Pritsker, Watters e Wolfe [1969] foi aplicado a uma situação em que existiam três projectos para sequenciar, representando um total de oito encomendas (3+3+2), utilizando três tipos de recursos. Foram consideradas quatro restrições: conclusão da encomenda, conclusão do projecto, relações de precedência entre as encomendas e disponibilidade de recursos. As encomendas deviam ser sequenciadas de forma a minimizar a duração total do projecto e cada encomenda devia ser iniciada o mais cedo possível, desde que isso não provocasse um acréscimo na duração total do projecto. Para se poderem estabelecer comparações, apresentaram também os resultados obtidos através da utilização das regras de sequenciamento *First Came*, *First Served* e *Minimum Project-Slack First* (esta regra dá prioridade aos projectos com base na sua folga, isto é, o intervalo de tempo correspondente à diferença entre as datas mais antecipada e mais tardia possíveis de conclusão do projecto).

A solução obtida através da programação matemática representa uma melhoria substancial em relação às soluções obtidas através da utilização das regras *First Came*, *First Served* e *Minimum Project-Slack First*. A formulação proposta

é mais eficiente do que as utilizadas em modelos anteriores, relativamente ao número de variáveis e ao número de restrições necessárias para modelar uma situação de sequenciamento.

Davis e Heidorn [1971] descreveram um algoritmo que permite calcular soluções óptimas (isto é, que minimiza a duração) para problemas de sequenciamento de redes de projectos com restrições de recursos, em situações de múltiplos requisitos de recursos por encomenda (actividade). O problema das restrições de recursos surge quando existem quantidades limitadas de cada um dos recursos necessários para executar as actividades do projecto. Dado que as quantidades disponíveis nem sempre são suficientes para satisfazer a procura de actividades concorrentes, é necessário recorrer a decisões de sequenciamento, com o consequente aumento na duração do projecto, superior à duração determinada pelo método do caminho crítico, o qual não contempla restrições de recursos. Davis e Heidorn [1971] analisaram o caso particular do problema de recursos múltiplos em que pode ser necessário mais do que um tipo de recurso, cuja disponibilidade é limitada, para cada encomenda do projecto.

Davis e Heidorn [1971] formularam o seguinte problema: é dado um conjunto finito de encomendas, cada uma delas com uma duração fixa inteira, necessitando de uma determinada quantidade de um ou mais recursos diferentes e sujeita a um conjunto de relações de precedência entre as encomendas que especificam as ordenações possíveis. As encomendas não podem

ser interrompidas depois de iniciadas e as quantidades disponíveis de recursos são limitadas. O objectivo é minimizar a duração do projecto, ou seja, o tempo necessário para executar todas as encomendas, sujeito às restrições enunciadas. Para a obtenção da solução, a formulação do problema é simplificada através da representação de cada encomenda do projecto como uma série de tarefas com duração unitária. A encomenda é desdobrada em tantas tarefas de duração unitária quantas as necessárias, por forma a que o somatório dos tempos de execução destas seja igual à duração da encomenda. Isto é:

T_j - tarefa j ;

$A = (T_1, T_2, \dots)$ - conjunto de todas as tarefas no projecto;

Z - conjunto de tarefas atribuídas ao dia i ;

n - duração do projecto;

$\bar{r}(T_j) = (\bar{r}_{1j}, \bar{r}_{2j}, \dots, \bar{r}_{mj})$ - vector de recursos necessários para a tarefa j ;

\bar{r}_{kj} - unidades do recurso k necessárias para a tarefa j ;

$\bar{R}_{zi} = \sum_{j \in Z_i} \bar{r}(T_j) = (r_{1i}, r_{2i}, \dots, r_{mi})$ - vector de recursos necessários ao subconjunto das tarefas Z_i ;

r_{ki} - unidades do recurso tipo k necessárias para a conclusão das tarefas de Z_i ;

$\sum_{i=1}^n \bar{R}_{zi} = \bar{R}_A$ - vector soma do total de recursos necessários para o projecto;

$\bar{R}_L = (l_1, l_2, \dots, l_m)$ - vector das quantidades disponíveis de recursos;

l_j - número de unidades do recurso j disponíveis durante o projecto.

O problema pode então ser formulado da seguinte forma: encontrar a colecção de subconjuntos de A , isto é (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) , que minimize n , sujeito às seguintes condições:

- (1) $\bigcup_{i=1}^n Z_i = A$
- (2) $Z_i \cap Z_j = \emptyset, \forall i \neq j$
- (3) $\bar{R}_{Z_i} \leq \bar{R}_L$
- (4) Se $T_1 < T_2$ e $T_1 \in Z_i, T_2 \in Z_j$, então $i \leq j$
- (5) Se $T_1 \in Z_i$ e $T_1 \ll T_2$ então $T_2 \in Z_{i+1}$

onde " \ll " significa "deve preceder imediatamente"

Um subconjunto de A , $S_j = (T_1, T_2, \dots, T_m)$ diz-se exequível se $T_j \in S_j$ e $T_i < T_j$ implica que $T_i \in S_j$. Ou seja, um subconjunto exequível é um subconjunto que, se contém uma determinada tarefa, então contém todas as que a antecedem. O método utilizado por Davis e Heidorn [1971] para gerar subconjuntos baseia-se em Gutjahr e tem as seguintes propriedades: (i) todos os subconjuntos possíveis são criados; (ii) não há duplicação de subconjuntos possíveis e, (iii) todas as combinações de tarefas geradas são subconjuntos possíveis. A aplicação deste procedimento ao planeamento de uma rede de projectos revela as seguintes propriedades: (i) uma tarefa aparece pela primeira vez em

subconjuntos possíveis gerados na fase K , onde K é o momento de início mais cedo (*Early Start Time*) da tarefa; (ii) o número de fases é igual ao número de períodos de tempo no caminho mais longo da rede de precedências da tarefa, isto é, o "caminho crítico".

A principal desvantagem do procedimento apresentado reside no número de subconjuntos possíveis gerados. Mesmo para problemas pequenos, o número de subconjuntos possíveis gerados pode ser bastante grande, dependendo da duração das encomendas originais e da complexidade (inter-relações) da rede [Davis e Heidorn, 1971]. O procedimento pode ser melhorado com a redução do número total de subconjuntos possíveis gerados sem deixar de assegurar a obtenção de uma solução óptima, se existir. A abordagem básica para reduzir o número de subconjuntos possíveis gerados consiste em seleccionar uma duração desejada (n') para o projecto e, durante a execução do algoritmo eliminar os subconjuntos possíveis que: (i) não podem possivelmente aparecer ao longo de um caminho de duração n' ou inferior e, (ii) não permitam a criação de outros subconjuntos possíveis.

Para uma dada duração desejada (n'), podem ser determinados e aplicados um de dois critérios para eliminar os subconjuntos possíveis: eliminação com base nas restrições de precedência ou eliminação com base nas restrições de recursos. Pelo critério baseado nas restrições de precedência é possível especificar para cada tarefa o dia mais tardio para a sua execução sem alteração da duração desejada do projecto. Considerando apenas o critério da

eliminação com base nas restrições de recursos, e conhecendo as quantidades totais de recursos necessárias para executar a totalidade do projecto, é possível especificar para cada dia a quantidade mínima de cada recurso que já deve ter sido consumida até esse dia, por forma a que as necessidades de recursos remanescentes possam ser distribuídas pelos restantes dias, dentro da duração objectivo.

Davis e Heidorn [1971] admitiram a possibilidade de violação de duas das condições inicialmente estabelecidas para o procedimento descrito, por forma a tornar a sua aplicação mais geral: (i) as encomendas não serem executadas em contínuo, ou seja, admitem-se interrupções na execução das encomendas e, (ii) as necessidades de recursos poderem variar durante a execução da encomenda.

Para testar o desempenho do algoritmo foram criados 65 problemas, cada um com 50 a 95 tarefas de duração unitária (que representavam 30 encomendas inicialmente) e envolvendo 3 recursos diferentes por encomenda. Foram encontradas soluções óptimas para 48 problemas e para os restantes 17 foram encontradas soluções com uma duração inferior em, pelo menos, um dia relativamente à solução encontrada pela heurística *Resource Scheduling Method* (RSM).

Resumo

Neste capítulo fizemos uma revisão da literatura sobre os problemas do sequenciamento da produção por encomenda e do sequenciamento das actividades com restrições de recursos.

Começámos por abordar o problema do planeamento da capacidade de produção, referindo a forma como este é executado e algumas das dificuldades que podem surgir na definição da capacidade de produção, sobretudo num sistema de produção por encomenda. Referimos ainda a importância, cada vez maior, da utilização eficiente da capacidade de produção instalada. Apresentámos alguns casos de investigações realizadas com o objectivo de melhorar ou optimizar a utilização da capacidade de produção ou dos recursos de produção disponíveis.

Na revisão que fizemos sobre o problema do sequenciamento da produção por encomenda constatámos que o principal objectivo da definição de um sequenciamento é o cumprimento das datas de conclusão das encomendas [Kanet e Hayya, 1982; Baker, 1984; Weeks, 1979; Vepsäläinen e Morton, 1987]. Constatámos também que o cumprimento da data de conclusão da encomenda é influenciado pela forma como essa data é definida [Kanet e Hayya, 1982; Baker, 1984; Weeks, 1979].

A revisão realizada sobre o problema do sequenciamento das actividades com restrições de recursos incidiu essencialmente em problemas de sequenciamento das actividades de um projecto com restrições de recursos. Constatámos que este é um problema com várias versões, caracterizadas pelo número de projectos que são sequenciados em simultâneo, pela função objectivo, pelas características

dos recursos e condições de utilização prioritária [Lee e Kim, 1996].

Decidimos abordar este problema tendo em atenção algumas semelhanças existentes entre o problema do sequenciamento das actividades de um projecto com restrições de recursos e o problema do sequenciamento da produção por encomenda, referidas por diversos autores [Serafini e Speranza, 1994; Cooper, 1976; Demeulemeester e Herroelen, 1992; Fumero e Vercellis, 1994].

Constatámos que a minimização da duração do projecto é o objectivo utilizado com mais frequência no problema do sequenciamento das actividades de um projecto com restrições de recursos [Cooper, 1976; Davis e Heidorn, 1971; Davis e Patterson, 1975; Nkasu, 1994; Pritsker, Watters e Wolfe, 1969]. Existem duas técnicas para a resolução destes problemas: Heurísticas e Modelos de Optimização [Lorterapong, 1994; Oguz e Bala, 1994]. As Heurísticas, não garantem a melhor solução, mas, de uma maneira geral, permitem obter boas soluções a um custo aceitável. Os Modelos de Optimização, procuram a solução óptima para o problema, formulando e resolvendo o problema como um programa matemático.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para avaliar o desempenho de uma central de produção de betão do tipo radial, operando sob diversas configurações definidas pela combinação de três níveis de recursos de transporte, duas regras de sequenciamento de fabrico de encomendas recebidas e três níveis de capacidade de colocação do betão, correspondendo a um total de 18 configurações diferentes. Descrevemos também o processo de produção do betão numa central radial. O desempenho da central radial será avaliado para as 18 configurações referidas, utilizando um desenho experimental do tipo *full factorial*. O desempenho do sistema será avaliado através das variáveis "número médio de encomendas executadas" e "tempo médio da encomenda no sistema".

Factores Experimentais

Consideraram-se três factores experimentais: recursos de transporte, regra de sequenciamento e capacidade de colocação.

O primeiro factor, recursos de transporte, define a capacidade máxima de transporte do betão, medida em metros cúbicos (m^3), entre a central de produção e o local de colocação do betão. Consideraremos três níveis, correspondendo a três capacidades máximas de transporte de betão. No nível I, a capacidade máxima é de $24m^3$; no nível II

de 30m^3 , e no nível III, a capacidade máxima de transporte é de 36m^3 .

O transporte do betão é efectuado em camiões-betoneira, isto é, camiões concebidos para o transporte do betão, equipados com um cilindro, designado por betoneira, onde é transportado o betão. No interior desta, existe um "sem-fim" fixo que, em conjunto com o movimento rotativo da betoneira no sentido dos ponteiros do relógio, evita a separação dos componentes do betão. A capacidade de transporte do betão está limitada à capacidade de carga da betoneira.

A definição da capacidade máxima de transporte foi feita tendo por base a capacidade de carga da betoneira e as restrições legais a que a actividade de transporte está sujeita em Portugal (Portaria 850/94). De acordo com informações obtidas junto de uma empresa de montagem de camiões-betoneira, a maior parte dos camiões-betoneira utilizados em Portugal são veículos com três eixos de rodas que utilizam uma betoneira com uma capacidade máxima de carga de 7m^3 . A legislação vigente (Portaria 850/94) limita a 26 toneladas o peso bruto máximo dos veículos com três eixos de rodas, e define peso bruto como "o conjunto da tara e da carga que o veículo pode transportar". A tara é definida como "o peso do veículo em ordem de marcha sem passageiros nem carga, com o reservatório cheio de combustível, líquido de arrefecimento, lubrificantes, ferramentas e roda de reserva, quando esta seja obrigatória" [DR, 1994].

A tara de um veículo de três eixos de rodas, equipado para o transporte de betão, é de cerca de 11.000 quilos

(conforme informações recolhidas junto de uma empresa de montagem de camiões-betoneira). Restam, assim, cerca de 15.000 quilos para o transporte de betão, o que equivale a aproximadamente 6m^3 de betão (1m^3 betão ≈ 2.400 quilos).

Assim, o nível I, com uma capacidade máxima de carga de 24m^3 , é equivalente à utilização de quatro camiões-betoneira; o nível II a cinco camiões-betoneira e o nível III a seis camiões-betoneira.

O segundo factor, a regra de sequenciamento, define o critério utilizado para sequenciar a encomenda a executar. Utilizaremos duas regras: FIFO (*First In, First Out*) e EPME (Executa Primeiro Maior Encomenda). A regra FIFO ordena a encomenda com base na ordem de chegada, executando em primeiro lugar a encomenda que chega primeiro. A regra EPME ordena a encomenda em função da sua dimensão, executando em primeiro lugar a encomenda de maior dimensão. A definição desta regra teve por base informações recolhidas junto da empresa ABC.

O terceiro factor, capacidade de colocação, define a capacidade de colocação do betão na obra, medida em metros cúbicos por hora (m^3/hora). Consideraremos três níveis de capacidade de colocação: o nível I, com uma capacidade de $12,5\text{m}^3/\text{hora}$; o nível II, com uma capacidade de $25\text{m}^3/\text{hora}$; o nível III, com uma capacidade de $35\text{m}^3/\text{hora}$.

Os níveis de capacidade de colocação estão associados a diferentes formas de colocação do betão na obra. O nível I, com uma capacidade de $12,5\text{m}^3/\text{hora}$, corresponde à colocação do betão na obra com grua e balde. Nesta forma de colocação, o

betão é descarregado do camião-betoneira para um balde. A grua desloca o balde pelo ar, levando-o até ao local de colocação do betão, que pode ser alguns metros acima do solo ou num ponto ao nível do solo mas onde não seja possível aproximar o camião-betoneira. O nível II, com uma capacidade de $25\text{m}^3/\text{hora}$, corresponde à forma de colocação do betão na obra com autobomba. A autobomba é um camião especialmente concebido para a colocação do betão, dispondo de uma tremonha de recepção, colocada no extremo oposto ao da cabine de condução do camião, para onde o camião-betoneira vai descarregando o betão. O betão descarregado é bombeado através de um conjunto de tubagens articuladas, que permitem colocar o betão no local desejado. A bombagem é efectuada através de um conjunto de êmbolos existentes na tremonha de recepção que empurram o betão para as tubagens. O nível III, com uma capacidade de $35\text{m}^3/\text{hora}$, corresponde à colocação directa do betão na obra. Nesta forma de colocação, o betão sai do camião-betoneira directamente para o solo sendo utilizado apenas um género de caleira. A caleira é utilizada para recolher e direccionar a saída do betão do camião-betoneira para determinado local, ao nível do solo ou mais abaixo.

O desempenho do sistema será avaliado através de 18 tratamentos diferentes, reflectindo, cada um, uma configuração diferente. Cada configuração é determinada pelo nível de recursos de transporte, pela regra de sequenciamento e pela capacidade de colocação do betão. A

Tabela III mostra o conjunto das 18 condições de tratamento utilizadas no modelo.

Tabela III - O Desenho Experimental

COLOCAÇÃO	TRANSPORTE					
	24m³		30m³		36m³	
	SEQUENCIAMENTO					
	FIFO	EPME	FIFO	EPME	FIFO	EPME
12,5m³/hora	X	X	X	X	X	X
25m³/hora	X	X	X	X	X	X
35m³/hora	X	X	X	X	X	X

m³ - Metros cúbicos

FIFO - *First In, First Out*

EPME - Executa Primeiro Maior Encomenda

Para cada uma das variáveis utilizadas para medir o desempenho do sistema, "número médio de encomendas executadas" e "tempo médio da encomenda no sistema", este trabalho de investigação testa as seguintes hipóteses:

H₁ - O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente do nível de recursos de transporte (RETR) .

H₂ - O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente do nível de recursos de transporte (RETR) .

H₃ - O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente da regra de sequenciamento (RSEQ) .

H₄ - O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente da regra de sequenciamento (RSEQ) .

- H_5 - O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente da capacidade de colocação (RECO).
- H_6 - O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente da capacidade de colocação (RECO).
- H_7 - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento no número médio de encomendas executadas (RETR×RSEQ).
- H_8 - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento no tempo médio da encomenda no sistema (RETR×RSEQ).
- H_9 - Não existe efeito de interacção entre a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (RSEQ×RECO).
- H_{10} - Não existe efeito de interacção entre a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (RSEQ×RECO).
- H_{11} - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (RETR×RECO).
- H_{12} - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (RETR×RECO).
- H_{13} - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (RETR×RSEQ×RECO).

H₁₄- Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (RETR×RSEQ×RECO).

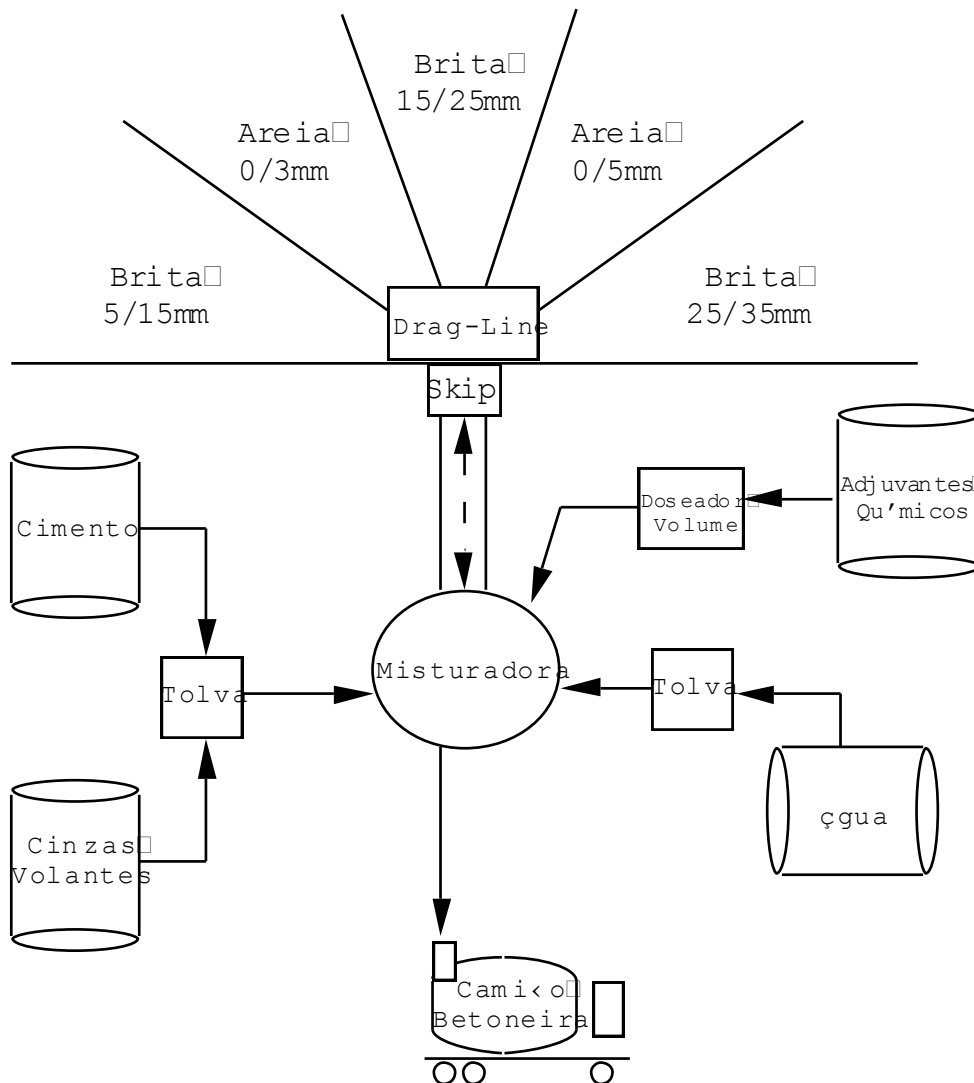
Descrição do Processo de Produção do Betão na Empresa ABC

A empresa ABC opera uma central radial ou tipo estrela. A designação "radial" ou tipo estrela, deriva do facto de duas das principais matérias-primas, areia e brita, estarem armazenadas no solo a céu aberto, encostados a uma parede de cimento, ocupando uma área em forma de semi-círculo. Esta área está dividida em cinco partes iguais, separadas por divisórias de cimento, sendo cada uma das partes utilizada para armazenar diferentes tipos de areia e brita.

A central radial da empresa ABC pode produzir qualquer uma das sessenta qualidades de betão apresentadas na Tabela II. Dado o elevado número de qualidades de betão que a central está habilitada a produzir, e uma vez que não existem diferenças tecnológicas no número e na sequência de operações, denominaremos por "betão" o produto final que se pretende fabricar.

A Figura II mostra a disposição das diversas máquinas e matérias-primas utilizadas na produção e transporte do betão na central radial da empresa ABC.

Figura II - A Central Radial da Empresa ABC



O planeamento da produção do betão na empresa ABC é feito com base nas encomendas efectuadas pelos clientes. As encomendas especificam a qualidade do betão, o local, a data e a hora de entrega. Os clientes colocam as suas encomendas por uma de duas vias: (i) através do vendedor da empresa, que com ele estabeleceu o contacto ou, (ii) por telefone, contactando o encarregado da central a quem fornecem as especificações da encomenda.

As encomendas são colocadas com uma antecedência que varia consoante o tipo de obra. Quando se trata de grandes obras, como a construção de viadutos, em que podem ser necessárias várias centenas de metros cúbicos de betão, é normal a encomenda ser efectuada com uma semana, ou mais, de antecedência. Em obras pequenas, como a construção de uma placa para uma casa, onde o volume de betão necessário ronda os quinze metros cúbicos, a encomenda é efectuada com uma antecedência que varia entre algumas horas a dois dias.

A produção do betão tem início depois de o operador da central introduzir, num sistema informatizado, a "receita" do betão pretendido, que define a qualidade (tipo, classe e inerte), a quantidade, o nível de humidade da areia e a identificação do camião-betoneira que vai ser carregado. É o sistema informatizado que coordena as operações de pesagem dos diversos componentes utilizados na produção do betão, a sua movimentação até à misturadora, o processo de mistura e de saída do betão para o camião-betoneira. A introdução dos dados pelo operador no sistema informatizado demora cerca de 90 segundos. O operador acompanha o funcionamento da central a partir de uma cabine assente numa plataforma colocada a cerca de 4 metros de altura do solo entre a misturadora e a parede de cimento onde estão encostados os inertes (areia e brita).

Com base na "receita" de betão seleccionada e no valor do nível de humidade da areia, o sistema informatizado calcula as quantidades necessárias de areia, brita, cimento, cinzas volantes e água. A informação sobre o nível de

humidade existente na areia é importante na medida em que afecta o peso da areia. Em dias de chuva, o nível de humidade existente na areia é superior ao de um dia seco, pelo que a areia, ao ser pesada, acusa um peso superior ao seu peso real. Este acréscimo do peso da areia é provocado pela acumulação de alguma água na areia, sendo necessário efectuar um ajustamento na quantidade de água necessária.

A produção do betão é realizada numa misturadora, que se encontra a cerca de quatro metros de altura do solo. A misturadora é um recipiente circular que dispõe de um conjunto de seis braços no seu interior, aos quais estão ligadas diversas pás em diferentes pontos. A misturadora tem uma abertura na parte superior, por onde entram os diversos componentes utilizados na produção de betão, e outra fechada na parte inferior, que se abre para permitir a saída do betão para o camião-betoneira. A misturadora tem capacidade para produzir lotes de 1m^3 de betão. Todos os componentes, areia, brita, cimento, cinzas volantes, água e adjuvantes químicos, são pesados antes de serem transferidos para a misturadora.

A areia e a brita são também designados por inertes. Utilizam-se dois tipos de areia e três de brita. A distinção entre os diferentes tipos de areia e de brita é feita através da granulometria, isto é, através da dimensão do grão de areia e da brita. Os dois tipos de areia utilizada têm uma dimensão variável entre 0 e 3 milímetros (areia 1) e entre 0 e 5 milímetros (areia 2). Os três tipos de brita utilizados têm uma dimensão variável entre 5 e 15 milímetros

(brita 1), entre 15 e 25 milímetros (brita 2) e entre 25 e 35 milímetros (brita 3). Os dois tipos de areia e os três tipos de brita estão armazenados no solo a céu aberto, nas cinco partes em que o semi-círculo está dividido, encostados a uma parede de cimento, a cerca de cinco metros da misturadora.

A areia e a brita são pesadas num *skip*. Um *skip* é um género de vagoneta que pesa e transporta a areia e a brita até à misturadora. A areia e a brita entram, sequencialmente, no *skip* através da abertura de uma comporta existente para cada uma das divisórias. À medida que cada um dos inertes cai no *skip*, vai sendo pesado e quando se atinge o peso necessário do inerte que está a entrar, a comporta fecha-se, abrindo-se outra comporta correspondente a outro inerte. O fecho e abertura das comportas é controlado automaticamente pelo sistema informatizado onde o operador introduziu os dados sobre a qualidade de betão pretendido. O *skip* está assente sobre uns carris, no lado oposto da parede de cimento onde a areia e a brita estão armazenadas, que lhe permitem efectuar um movimento ascendente até junto da misturadora para descarregar a areia e a brita. Depois de despejar a areia e a brita na misturadora, o *skip* volta para baixo, para efectuar nova pesagem ou para aguardar o início de um novo ciclo de produção.

As sucessivas pesagens dos diversos tipos de areia e brita exigem que os restantes componentes sejam puxados para junto da parede. O processo de pesagem no *skip*, através da abertura de uma comporta, cria um "vazio" junto da parede de

cimento onde os diversos tipos de areia e brita estão encostados. Para puxar os diversos tipos de areia e brita para junto da parede de cimento, é utilizado um *drag-line*, colocado a meio da parede de cimento, a uma altura de cerca de oito metros do solo. Um *drag-line* é um género de draga, comandada por um operador, com um balde suspenso por uma corrente que puxa os diversos tipos de areia e brita para junto da parede de cimento onde estão as comportas que permitem a saída destes componentes para o *skip*.

O cimento e as cinzas volantes estão armazenados em silos de metal, colocados na vertical, a uma distância de cerca de quatro metros da misturadora. Estes dois componentes são transferidos através de um "extractor sem fim", existente para cada um dos silos, para uma tolva. Uma tolva é um género de balde suspenso por cima da misturadora que pesa, sequencialmente, o cimento e as cinzas volantes e retém estes dois componentes até ao momento em que os deixa sair, por uma abertura existente na parte inferior, para a misturadora.

A água é transferida, através de canalizações, para outra tolva, suspensa também por cima da misturadora, onde é pesada e retida até ao momento em que sai, por uma abertura existente na parte inferior da tolva, para a misturadora. A água utilizada está armazenada num depósito de metal e é extraída de um furo existente na zona onde a central está instalada. O recurso ao armazenamento da água num depósito é justificado pela necessidade de garantir o fornecimento permanente de água.

As operações de pesagem dos diferentes tipos de areia e brita, do cimento, cinzas volantes e água são feitas em simultâneo e demoram cerca de 50 segundos. Depois de pesados estes componentes, se a misturadora ainda estiver ocupada, aguardam dentro do recipiente onde foram pesados até serem lançados em simultâneo na misturadora, que os recebe com o conjunto de braços e pás já em movimento rotativo. Após a entrada na misturadora dos diferentes tipos de areia e brita, do cimento, das cinzas volantes e da água, o operador da central despoleta a entrada dos adjuvantes químicos. Os adjuvantes químicos estão armazenados dentro de um silo de fibra de vidro a cerca de três metros da misturadora. A quantidade de adjuvantes químicos necessária é medida através de um doseador de volume, comandado pelo operador da central.

Os componentes do betão, um ou dois tipos de areia, um, dois ou três tipos de brita, cimento, cinzas volantes, água e adjuvantes químicos, são misturados no interior da misturadora, através do movimento rotativo efectuado pelo conjunto de braços e pás existentes no seu interior. A mistura dos diversos componentes da misturadora, que produz 1m^3 de betão de cada vez, demora cerca de 40 segundos. Ao fim deste tempo, abre-se uma comporta na parte inferior da misturadora para transferir o betão para um camião-betoneira, mantendo, a misturadora, o conjunto de braços e pás sempre em movimento rotativo. A transferência do betão misturado para o camião-betoneira demora cerca de 10 segundos.

Depois de o betão sair para o camião-betoneira, a comporta existente na parte inferior da misturadora fecha-se automaticamente e, se o camião-betoneira ainda não tiver a carga pretendida, normalmente 6m^3 , começa a dar entrada novo "lote" de componentes na misturadora. Este novo "lote" de componentes foi pesado ao mesmo tempo que era misturado o metro cúbico de betão que foi descarregado. Quando o camião-betoneira tem a carga pretendida, a central pára pelo menos durante 90 segundos, o tempo necessário para serem executadas, em simultâneo, duas operações: (i) o operador voltar a introduzir no sistema informatizado, a "receita" do betão pretendido, a quantidade, o nível de humidade do ar e a identificação do camião-betoneira que vai ser carregado e, (ii) para se efectuar a mudança de camião-betoneira, isto é, para que o camião-betoneira já carregado possa sair de baixo da misturadora e outro camião-betoneira possa estacionar por baixo da misturadora. Se não houver necessidade de efectuar outro carregamento, a paragem será mais prolongada.

O transporte do betão até ao local de colocação é efectuado pelo camião-betoneira, que recebe o betão que sai da misturadora. O camião-betoneira, tal como se refere na secção anterior, é um camião concebido para o transporte do betão, equipado com um género de cilindro, designado de betoneira, onde é transportado o betão. O betão é transferido para dentro da betoneira através de uma abertura existente na parte superior da base da betoneira. Esta abertura é utilizada também para a descarga do betão. A

betoneira recebe o betão à saída da misturadora em movimento rotativo, no sentido dos ponteiros do relógio, desde a entrada do primeiro metro cúbico de betão. O movimento rotativo da betoneira, no sentido dos ponteiros do relógio, mantém-se durante a viagem entre a central e o local de colocação do betão para evitar a segregação do betão.

O camião-betoneira, logo que tem a carga pretendida, normalmente 6m^3 , inicia o transporte do betão até ao local de colocação. A distância entre a central e o local onde o betão vai ser colocado é variável. O tempo necessário para percorrer a distância entre a central e o local de colocação do betão depende da distância a percorrer e do percurso, "estrada" ou "urbano". A viagem é efectuada a uma velocidade média de 50 quilómetros/hora num percurso de "estrada" e a uma velocidade média de 30 quilómetros/hora num percurso "urbano". Depois de chegar ao local onde vai ser colocado o betão, o camião-betoneira pode ter um período de imobilização de cerca de 90 segundos, antes de iniciar a operação de colocação. Este tempo pode ser utilizado para reforçar a amassadura do betão, através de um movimento mais acelerado da betoneira e/ou para o motorista se informar do local exacto de colocação do betão.

O camião-betoneira permanece no local de colocação do betão até estar concluída a operação de colocação. Para descarregar o betão do camião-betoneira, a betoneira efectua um movimento rotativo no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio. Desta forma, o "sem-fim" fixo existente no interior da betoneira, ao rodar ao contrário, vai empurrar o

betão para fora, saindo por um género de caleira, situada junto à abertura existente na parte superior da betoneira, para o solo, para um balde ou para a tremonha de recepção da autobomba para ser colocado. Depois de concluída a operação de colocação, o camião-betoneira regressa à central.

A colocação do betão é uma operação que visa, em primeiro lugar, descarregar o betão do camião-betoneira e, em segundo lugar, colocar o betão no local indicado pelo cliente. A colocação, tal como referimos na secção anterior, pode ser efectuada de três formas distintas: com grua e balde, com autobomba e colocação directa. Na colocação com grua e balde, o betão é descarregado do camião-betoneira para um balde, com uma capacidade média de $0,5\text{m}^3$ de betão. A grua desloca o balde pelo ar, levando-o até ao local de colocação do betão. Esta forma de colocação é utilizada sobretudo em locais de difícil acesso ao camião-betoneira ou onde não é tecnicamente possível colocar o betão com uma autobomba. Na colocação do betão com autobomba, o betão é colocado utilizando um camião concebido especificamente para a operação de colocação do betão, com a designação de autobomba. O betão é descarregado para uma tremonha de recepção, colocada no extremo oposto ao da cabine de condução do camião. À medida que vai sendo descarregado, o betão vai sendo empurrado por um conjunto de êmbolos existentes na tremonha de recepção que permitem bombear o betão por diversas tubagens, ligadas em contínuo, e colocá-lo em determinado local. As tubagens têm um comprimento variável, embora, a média oscile entre os 25 e

os 30 metros. A colocação directa consiste na saída do betão do camião-betoneira directamente para o solo, recorrendo-se apenas a um género de caleiras que permitem direccionar a saída do betão para o local onde será colocado.

A colocação efectuada com autobomba requer que a empresa ABC providencie os meios necessários à colocação do betão, isto é, que desloque até ao local de colocação um camião com autobomba para colocar o betão. Neste caso, a empresa ABC cobra um valor pelo serviço de colocação. Quando a colocação é com grua e balde, é o cliente que providencia os meios necessários à colocação do betão, ou seja, dispõe de uma grua e balde no local. Se a colocação for directa, utilizam-se as caleiras adicionais do camião-betoneira para direccionar a saída do betão. Neste caso o cliente também pode providenciar a construção de caleiras no local, por exemplo em madeira, para direccionar a saída do betão.

O Modelo de Simulação

Para testar as hipóteses de investigação foi construído um modelo de simulação representativo do funcionamento da central radial de produção de betão.

Walde [1991] refere que o valor da simulação reside na possibilidade de ver como é que o sistema reage quando determinadas condições desse sistema são alteradas sem, no entanto, corromper o sistema real.

As aplicações da simulação digital são bastante vastas: como ferramenta de investigação, na concepção de sistemas

flexíveis de produção, na compreensão de novas teorias de gestão da produção, na identificação e resolução de problemas, no planeamento de um novo sistema de produção, etc. [Walde, 1991].

Savsar e Al-Jawini [1995] referem a utilização da simulação no estudo do desempenho de um sistema de produção *just-in-time*, em detrimento da utilização de modelos matemáticos. Savsar e Al-Jawini [1995] justificam a escolha pelo facto de os modelos matemáticos implicarem a inclusão no modelo de muitas hipóteses restritivas. Walde [1991] refere também que uma das vantagens dos modelos de simulação, face aos modelos matemáticos, deriva do facto de os modelos de simulação utilizarem dados probabilísticos e de produzirem resultados probabilísticos, o que os torna mais próximos dos sistemas de produção reais. Por exemplo, é normal que os tempos de processamento e de movimentação variem, dentro de determinados intervalos, de unidade para unidade. Os modelos matemáticos, de acordo com Walde [1991], são determinísticos, dado que estes modelos utilizam estimativas específicas para as variáveis do modelo, produzindo, por isso, resultados determinísticos. Chan [1995] refere que os desenvolvimentos recentes dos programas de simulação, baseados sobretudo num *interface* gráfico, não só tornam mais fácil a utilização deste tipo de programas, como aumentam as suas possibilidades de aplicação.

O modelo de simulação foi construído com recurso ao programa SLAM (*Simulation Language for Alternative Modeling*), versão 2.1, uma linguagem de simulação baseada em

FORTTRAN [Pritsker, 1986]. A utilização deste programa parte da criação de uma rede, composta por nós e ramos, que representa as operações e os procedimentos do sistema a modelar. Os nós são colocados entre os ramos e são utilizados para modelar acontecimentos, pontos de decisão ou filas de espera. Os ramos ligam os nós e representam actividades às quais é associado um determinado tempo de processamento ou de espera. Pela rede fluem entidades, que podem representar objectos físicos, informação ou uma combinação de objectos físicos e informação. Para distinguir as entidades, utilizam-se atributos que permitem identificar o tipo, o valor ou o momento de criação da entidade, por exemplo [Pritsker, Sigal e Hammesfahr, 1989].

A Figura III mostra a rede que foi construída para o modelo de simulação.

No nó ENCOM do modelo, as entidades são criadas com intervalos de 120 minutos, sendo cada uma marcada com o seu tempo de criação que é registado no atributo 1 da entidade. Ou seja, cada entidade tem um atributo 1 que é único. A entidade representa, neste caso, a encomenda. A definição do intervalo de 120 minutos foi feita tendo por base informações recolhidas junto da empresa ABC, que permitiram calcular que, em média, a central radial executa 4 encomendas por dia (considerando um dia de trabalho com 8 horas, ou seja, 480 minutos).

Figura III - A Rede Construída para o Modelo de Simulação

(1/3)

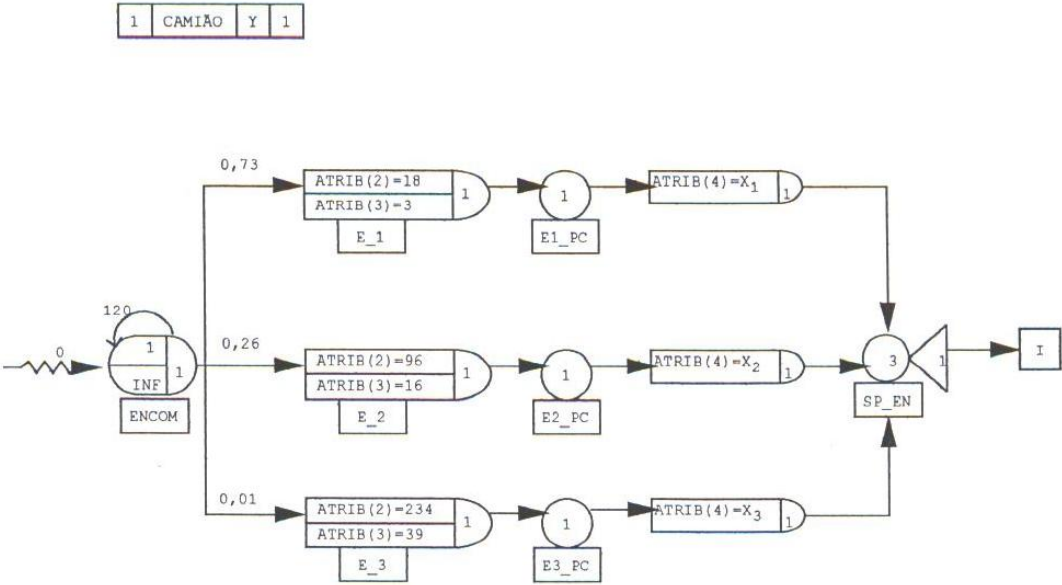


Figura III - A Rede Construída para o Modelo de Simulação
(2/3)

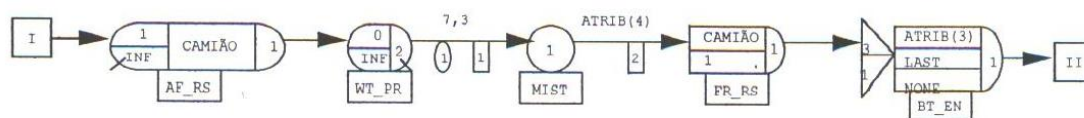
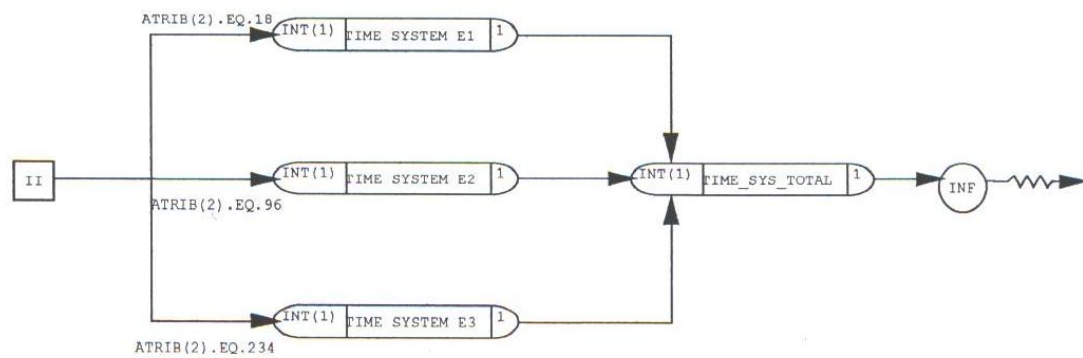


Figura III - A Rede Construída para o Modelo de Simulação

(3/3)



As informações recolhidas junto da empresa ABC permitiram também estabelecer uma classificação das encomendas e determinar o seu peso no total: (i) 73% do total são encomendas pequenas que correspondem a 18 metros cúbicos (m^3) de betão; (ii) 26% do total são consideradas médias, ou seja, encomendas de $96m^3$ de betão e, (iii) 1% são encomendas grandes, ou seja, de $234m^3$ de betão.

Com base na classificação acima enunciada definiu-se que: (i) 73% das encomendas criadas seguem pelo ramo que as conduz ao nóculo E_1; (ii) 26% seguem pelo ramo que as conduz ao nóculo E_2 e, (iii) 1% seguem pelo ramo que as conduz ao nóculo E_3. Nos nósculos E_1, E_2 e E_3, as encomendas são marcadas com mais dois atributos: o atributo 2, que define o tipo de encomenda, e o atributo 3, que indica o número de lotes de $6m^3$ necessários para executar a encomenda. Assim, para as encomendas que passam pelo nóculo E_1 (encomenda pequena), o atributo 2 é igual a 18 e o atributo 3 é igual a 3 ($18 \div 6$). As encomendas que passam pelo nóculo E_2 têm o atributo 2 igual a 96 (encomenda média) e o atributo 3 igual a 16 ($96 \div 6$). As encomendas que passam pelo nóculo E_3 têm o atributo 2 igual a 234 e o atributo 3 igual a 39 ($234 \div 6$).

As encomendas, seguindo por ramos diferentes, passam por um nóculo de continuação (E1_PC, ou E2_PC, ou E3_PC) que as leva a outro nóculo onde são marcadas com o atributo 4. O atributo 4 determina o tempo necessário para efectuar a viagem de ida e volta entre a central e o local indicado pelo cliente, mais o tempo de colocação para um lote de $6m^3$

betão. O tempo necessário para efectuar a viagem depende da distância a percorrer e da velocidade média.

Para cada tipo de encomenda foi definida uma distância e um determinado percurso (urbano ou de estrada) que determina a velocidade média. Para as encomendas pequenas definiu-se uma distância de 30 quilómetros em percurso de estrada. Para as encomendas médias definiu-se uma distância de 50 quilómetros em percurso de estrada. Para as encomendas grandes definiu-se uma distância de 25 quilómetros em percurso urbano. Considerou-se, para o percurso de estrada, uma velocidade média de 50 quilómetros por hora e, para o percurso urbano, uma velocidade média de 30 quilómetros por hora. A definição das distâncias, do tipo de percurso e da velocidade média foi feita tendo por base informações recolhidas junto da empresa ABC. O tempo de colocação do betão é função da capacidade de colocação definida para cada configuração. Foram definidos 3 níveis de capacidade de colocação: $12,5\text{m}^3/\text{hora}$, $25\text{m}^3/\text{hora}$ e $35\text{m}^3/\text{hora}$. Assim, e considerando um nível de capacidade de colocação de betão de $12,5\text{m}^3/\text{hora}$, para as encomendas pequenas o atributo quatro será igual a 65, para as médias será igual a 89 e para as encomendas grandes o atributo quatro será igual a 79.

Depois de passarem pelo nóculo que marca as encomendas com o atributo 4, estas seguem para o nóculo SP_EN. Neste nóculo cada encomenda é dividida no número de entidades indicado pelo atributo 3, mantendo estas os atributos da encomenda original. As entidades resultantes da divisão, todas com a dimensão de 6m^3 , fluem para o nóculo AF_RS onde

esperam pela disponibilidade de recursos de transporte. A capacidade deste recurso é função do nível de recursos de transporte definido para cada configuração. Consideraram-se três níveis para os recursos de transporte: 24m^3 que correspondem a 4 camiões-betoneira ($24 \div 6$), 30m^3 que correspondem a 5 camiões-betoneira ($30 \div 6$) e 36m^3 que correspondem a 6 camiões-betoneira ($36 \div 6$). O nível de recursos de transporte da configuração é indicado no nóculo *RESOURCE*, colocado no canto superior esquerdo da figura, em separado. Na posição do Y estará 4, 5 ou 6, consoante o nível de recursos de transporte for de 24m^3 , 30m^3 ou 36m^3 , respectivamente.

Quando estão disponíveis um ou mais camiões-betoneira, é seleccionada uma entidade que segue para o nóculo WT_PR. A selecção da entidade é feita de acordo com a regra de sequenciamento definida para a configuração, que pode ser a FIFO (*First In, First Out*) ou a EPME (Executa Primeiro Maior Encomenda). Quando se utiliza a regra FIFO, a selecção é feita de acordo com o tempo de criação, registado no atributo 1. Quando a regra de sequenciamento é a EPME, a selecção é feita em função do valor do atributo 2 (18, 96 ou 234) que define o tipo de encomenda.

No nóculo WT_PR as entidades são sujeitas à actividade que as conduz ao nóculo MIST. Esta actividade é representada pela passagem por um ramo onde cada entidade demora 7,3 minutos. Este é o tempo necessário para efectuar as operações de pesagem de componentes, mistura e descarga de 6m^3 de betão para o camião-betoneira. Depois de concluídas

estas operações, as entidades seguem do nóculo MIST para o nóculo FR_RS. O ramo por onde as entidades fluem corresponde à actividade de transporte e colocação, com uma duração igual à do valor do atributo 4.

Quando chegam ao nóculo FR_RS, as entidades libertam unidades de recursos de transporte, que ficam disponíveis para outras utilizações, e seguem para o nóculo BT_EN. Neste nóculo as entidades esperam até estarem reunidas 3, 16 ou 39 entidades com o mesmo tempo de criação, o valor do atributo 1. Após a reunião das entidades que formam uma encomenda, esta segue por um de três ramos, consoante o tipo, e passa por um nóculo onde são recolhidas estatísticas relativamente ao tempo no sistema. Depois deste nóculo, as encomendas passam ainda por outro nóculo de recolha de estatísticas para calcular o número de encomendas executadas, após o que abandonam a rede ao passar pelo último nóculo.

A representação gráfica da rede é complementada com a definição de instruções de controlo [Pritsker, Sigal e Hammesfahr, 1989], que definem a regra de sequenciamento a utilizar, o número de replicações a executar, a informação estatística que se pretende recolher, o instante em que as estatísticas devem ser "limpas", o instante em que devem ser feitas as recolhas de estatísticas, o momento em que deve ser terminada a execução do modelo de simulação e a compilação do programa que executa a rede representada graficamente, entre outras.

Verificação do Modelo

A verificação do modelo foi feita através da comparação dos resultados obtidos em várias replicações do mesmo, em que se utilizou uma configuração idêntica à da central radial da empresa ABC, com dados de produção reais da referida central. Constatou-se que o modelo estava a funcionar como esperado.

Foi efectuada também uma análise da evolução de uma das replicações, em que a recolha de dados estatísticos era feita no mesmo instante em que era criada uma nova encomenda, ou seja, com intervalos de 120 minutos. Desta forma foi possível analisar com detalhe a evolução das encomendas no sistema.

Foram ainda efectuados alguns testes em que foram introduzidas alterações no intervalo de tempo utilizado para gerar entidades, utilizando valores extremos, para verificar se os resultados obtidos acompanhavam as alterações introduzidas.

Resumo

Este capítulo descreveu a metodologia utilizada para avaliar o desempenho de uma central radial de produção de betão. Foi apresentada a descrição do processo de produção do betão na central radial da empresa ABC, que serviu de base para a construção do modelo de simulação.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das replicações da simulação do estudo experimental e do estudo principal. É apresentada também a análise estatística dos resultados para cada uma das duas variáveis utilizadas para medir o desempenho do sistema.

Estudo Experimental

Os modelos de simulação têm um período de estabilização durante o qual o desempenho do sistema em análise é distorcido [Conway, 1963]. A distorção do desempenho do sistema, durante o período de estabilização, é provocada pela condição inicial do modelo ou pelo estado de arranque. Como refere Pristker [1986], a condição inicial normalmente utilizada é "vazio e pronto a ser utilizado", isto é, quando a simulação tem início não existem entidades no sistema e todos os serviços, actividades e recursos estão disponíveis. A determinação do fim do período de estabilização do modelo representativo do sistema é importante para se poder definir a partir de que instante é que se deve iniciar a recolha de dados que permitirão analisar o seu desempenho.

Para determinar a partir de que instante o modelo estabilizava, foi efectuado um estudo experimental em que se analisou o comportamento da variável "tempo médio da encomenda no sistema". No estudo experimental foram

seleccionadas as quatro configurações, indicadas na Tabela IV.

Tabela IV - Configurações do Estudo Experimental

	RECURSOS DE TRANSPORTE	REGRA DE SEQUENCIAMENTO	CAPACIDADE DE COLOCAÇÃO
1.	24m ³	FIFO	35m ³ /hora
2.	24m ³	EPME	35m ³ /hora
3.	36m ³	FIFO	12,5m ³ /hora
4.	36m ³	EPME	12,5m ³ /hora

m³ - Metros cúbicos

FIFO - *First In, First Out*

EPME - Executa Primeiro Maior Encomenda

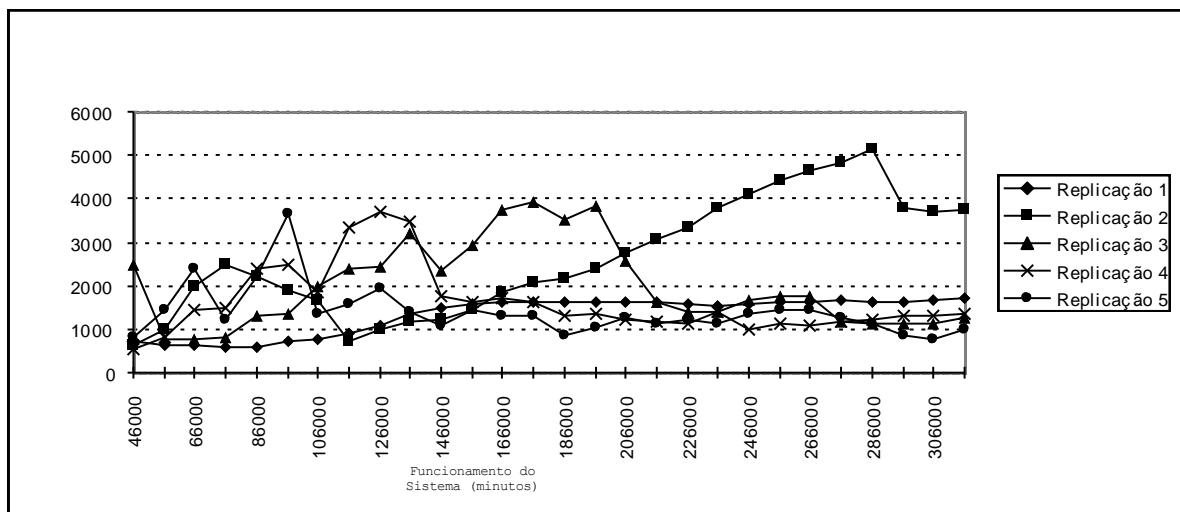
Para cada configuração foram executadas cinco replicações do modelo, o mesmo que em estudos anteriores [Pereira, 1990]. Cada replicação do modelo foi executada utilizando as mesmas condições iniciais, ou seja, "vazio e pronto a ser utilizado". A primeira recolha de dados sobre a variável "tempo médio da encomenda no sistema", em cada replicação, ocorreu ao fim de um período razoavelmente amplo de 96.000 minutos, escolhido aleatoriamente. As recolhas subsequentes foram executadas no final de incrementos de 10.000 minutos, até se atingir um valor de 316.000 minutos, perfazendo assim um total de 22 incrementos.

Uma vez que a recolha de dados da variável "tempo médio da encomenda no sistema" foi efectuada no instante 96.000 minutos, escolhido aleatoriamente, foram realizadas algumas observações complementares da mesma variável para valores inferiores a 96.000 minutos. Assim, a partir do instante

96.000 minutos, fizeram-se cinco observações para valores separados por decrementos de 10.000 minutos. A inspecção visual revelou grande instabilidade do sistema para valores compreendidos entre o instante 46.000 minutos e 96.000 minutos.

Com base na análise visual dos dados, o sistema, aparentemente, estabiliza ao fim de um período de 216.000 minutos. A Figura IV mostra a evolução da variável "tempo médio da encomenda no sistema" na configuração 1 do estudo experimental ($24\text{m}^3 \times \text{FIFO} \times 35\text{m}^3/\text{hora}$).

Figura IV - Evolução do Tempo Médio da Encomenda no Sistema para cada uma das cinco replicações da configuração 1



Os dados da variável "tempo médio da encomenda no sistema", recolhidos em cada uma das replicações das quatro configurações, foram utilizados para testar a seguinte hipótese nula relativa às quatro configurações do estudo experimental:

H_0 - O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo para o período de funcionamento entre 216.000 e 316.000 minutos.

A Tabela V mostra os resultados da análise de variância de cada uma das cinco replicações executadas para as quatro configurações do estudo experimental.

Tabela V - Resultados da Análise de Variância do Estudo Experimental

	Valor F	Prob > F	
Configuração 1			
Tempo Médio da Encomenda no Sistema			
Replicação 1	11,250	0,0085	
Replicação 2	1,208	0,3002	++
Replicação 3	6,093	0,0357	*
Replicação 4	1,511	0,2502	++
Replicação 5	4,006	0,0764	++
Configuração 2			
Tempo Médio da Encomenda no Sistema			
Replicação 1	5,878	0,0383	*
Replicação 2	1,481	0,2545	++
Replicação 3	6,303	0,0333	*
Replicação 4	2,548	0,1449	++
Replicação 5	6,616	0,0301	*
Configuração 3			
Tempo Médio da Encomenda no Sistema			
Replicação 1	12,695	0,0061	
Replicação 2	0,012	0,9164	++
Replicação 3	3,668	0,0877	++
Replicação 4	4,294	0,0681	++
Replicação 5	23,892	0,0009	
Configuração 4			
Tempo Médio da Encomenda no Sistema			
Replicação 1	9,940	0,0117	*
Replicação 2	0,056	0,8196	++
Replicação 3	3,913	0,0793	++
Replicação 4	5,637	0,0416	*
Replicação 5	21,946	0,0011	

* Não permite rejeitar H_0 ($\alpha=0,01$)

** Não permite rejeitar H_0 ($\alpha=0,05$)

A análise de variância foi realizada com recurso ao programa estatístico SAS (*Statistical Analysis System*).

Apesar dos resultados obtidos para a replicação 1 da configuração 1, para as replicações 1 e 5 da configuração 3 e para a replicação 5 da configuração 4, os resultados apresentados na Tabela V não permitem rejeitar a hipótese nula. Isto é, o tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo para o período de funcionamento entre 216.000 e 316.000 minutos. Aceitamos, por isso, que o sistema está estabilizado (*steady state*) a partir do instante 216.000 minutos.

Estudo Principal

Para se ter um determinado intervalo de confiança relativamente aos resultados obtidos, a determinação do número de replicações da simulação é uma das decisões que deve ser tomada antes de se executar o estudo principal. Pritsker [1986] propõe a seguinte fórmula para calcular o número de replicações necessárias:

$$I = \left(\frac{t_{\alpha/2, I-1} \times S_x}{g} \right)^2 \quad (1)$$

I - número de replicações necessárias;

$t_{\alpha/2, I-1}$ - valor da tabela de valores críticos da Distribuição *t* de Student, com I-1 graus de liberdade;

S_x - estimativa do desvio padrão em relação à variável de desempenho;

g - metade da amplitude do intervalo de confiança desejado.

Utilizando a fórmula proposta por Pritsker [1986], concluiu-se serem necessários oito replicações para se obter um intervalo de confiança de 95% relativamente aos resultados obtidos. Tendo em atenção o número de replicações consideradas no estudo experimental (cinco), o valor de t da distribuição de *Student* é $t(0,025;4) = 2,78$. O valor g no denominador da fórmula é igual a metade da amplitude do intervalo de confiança desejado ou o número de desvios padrões para metade do intervalo de confiança. Um intervalo de confiança de 95% resulta em aproximadamente dois desvios padrões para o intervalo de confiança, donde metade do intervalo será 1, que multiplicado pelo desvio padrão da variável de desempenho, na fórmula (1) vem:

$$I = \left(\frac{2,78 \times S_x}{1 \times S_x} \right)^2 = 7,7284 \approx 8 \text{ replicação.} \quad (2)$$

Para definir o período de observação, isto é, a duração da replicação ou o período de funcionamento do sistema, considerámos um mês com 22 dias úteis, a 8 horas por dia, o que equivale a 10.560 minutos.

Para eliminar a distorção provocada durante o período de estabilização, os vectores estatísticos são "limpos" no instante 216.000 minutos. Após cada período de observação,

de 10.560 minutos, são recolhidas estatísticas relativamente às variáveis "número médio de encomendas executadas" e "tempo médio da encomenda no sistema". No total recolhem-se 144 observações para a variável "número médio de encomendas executadas" e 144 observações para a variável "tempo médio da encomenda no sistema", ou seja, 3 níveis de recursos de transporte \times 2 regras de sequenciamento \times 3 níveis de capacidade de colocação \times 8 replicações.

No capítulo IV definimos catorze hipóteses de investigação que relacionam os factores experimentais, "recursos de transporte", "regra de sequenciamento" e "capacidade de colocação", com as duas variáveis utilizadas para medir o desempenho do sistema, "número médio de encomendas executadas" e "tempo médio da encomenda no sistema". Essas hipóteses são novamente reproduzidas aqui:

H0₁ - O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente do nível de recursos de transporte (RETR).

H0₂ - O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente do nível de recursos de transporte (RETR).

H0₃ - O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente da regra de sequenciamento (RSEQ).

H0₄ - O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente da regra de sequenciamento (RSEQ).

H0₅ - O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente da capacidade de colocação (RECO).

H0₆ - O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente da capacidade de colocação (RECO).

H0₇ - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento no número médio de encomendas executadas (RETR×RSEQ).

H0₈ - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento no tempo médio da encomenda no sistema (RETR×RSEQ).

H0₉ - Não existe efeito de interacção entre a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (RSEQ×RECO).

H0₁₀ - Não existe efeito de interacção entre a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (RSEQ×RECO).

H0₁₁ - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (RETR×RECO).

H0₁₂ - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (RETR×RECO).

H0₁₃ - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (RETR×RSEQ×RECO).

H0₁₄- Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (RETR×RSEQ×RECO).

Resultados para o Número Médio de Encomendas Executadas

São apresentados na Tabela VI os resultados das observações realizadas para a variável "número médio de encomendas executadas" (NMEE).

Tabela VI - Número Médio de Encomendas Executadas

	NMEE	Observações
TOTAL	82,49	* 140
Recursos de Transporte		
24m ³	73,75	* 44
30m ³	85,52	48
36m ³	87,46	48
Regra de Sequenciamento		
FIFO	84,93	72
EPME	79,90	* 68
Capacidade de Colocação		
12,5m ³ /hora	76,80	* 44
25m ³ /hora	84,23	48
35m ³ /hora	85,96	48

m³ - Metros cúbicos

FIFO - *First In, First Out*

EPME - Executa Primeiro Maior Encomenda

Na tabela anterior alguns valores da coluna das Observações estão assinalados com asterisco (*) para indicar a recolha de menos quatro observações. A configuração 24m³×EPME×12,5m³/hora (RETR×RSEQ×RECO) não permitiu a recolha de dados para as oito replicações previstas, devido a problemas de dimensionamento dos vectores estatísticos do *software* utilizado. Uma vez que o sistema se encontra estabilizado (*steady state*), admite-se que os resultados não seriam substancialmente diferentes que levassem à obtenção de conclusões distintas.

A análise dos dados da Tabela VI permite verificar que são os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação" que permitem obter valores mais elevados para a variável NMEE. É de realçar também que os acréscimos nos factores experimentais "recursos de transporte", de 30m³ para 36m³, e "capacidade de colocação", de 25m³/hora para 35m³/hora, traduzem-se em aumentos pouco significativos na variável NMEE. Constata-se também que é a regra de sequenciamento FIFO que permite a obtenção do valor mais elevado para a variável NMEE.

Na Tabela VII apresentamos a análise de variância da variável "número médio de encomendas executadas".

Tabela VII - Análise de Variância da Variável Número Médio de Encomendas Executadas

FONTE		GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	QUADRADOS MÉDIOS	VALOR F	PROB > F
Entre Grupos		17	15987,596	940,447	6,279	0,000
Dentro de Grupos		122	18271,375	149,765		
Total		139	34258,971	246,467		

FONTE		GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	VALOR F	PROB > F
HO ₁	RETR	2	4986,826	16,649	0,000 **
HO ₃	RSEQ	1	1072,564	7,162	0,008 **
HO ₅	RECO	2	2717,471	9,072	0,000 **
HO ₇	RETR*RSEQ	2	1899,031	6,340	0,002 **
HO ₉	RSEQ*RECO	2	935,011	3,122	0,480
HO ₁₁	RETR*RECO	4	4301,702	7,181	0,000 **
HO ₁₃	RETR*RSEQ*RECO	4	1119,924	1,869	0,120

** Estatisticamente significativo para $\alpha = 0,01$

Os dados da análise de variância da variável NMEE revelam que os factores experimentais "recursos de transporte" (RETR), "regra de sequenciamento" (RSEQ) e "capacidade de colocação" (RECO) são estatisticamente significativos, sendo, por isso rejeitadas as hipóteses nulas H_{01} , H_{03} e H_{05} . Quer isto dizer que o NMEE varia com o nível de recursos de transporte (H_{01}), com a regra de sequenciamento (H_{03}) e também com a capacidade de colocação (H_{05}). As interacções entre os factores experimentais "recursos de transporte x regra de sequenciamento" (RETRxRSEQ) e entre os factores experimentais "recursos de transporte x capacidade de colocação" (RETRxRECO), são também estatisticamente significativas. Por este motivo, as hipóteses H_{07} e H_{011} são também rejeitadas. As hipóteses H_{09} e H_{013} , que testam a existência de interacção entre os factores experimentais "regra de sequenciamento x recursos de colocação" (RSEQxRECO) e entre os factores experimentais "recursos de transporte x regra de sequenciamento x capacidade de colocação" (RETRxRSEQxRECO), respectivamente, não são rejeitadas.

A seguir vamos analisar os resultados da interacção entre o factor experimental "recursos de transporte" e os factores experimentais "regra de sequenciamento" e "capacidade de colocação".

Na Tabela VIII são apresentados os dados resultantes da interacção entre os factores experimentais "recursos de transporte x regra de sequenciamento" (RETRxRSEQ).

Tabela VIII - Número Médio de Encomendas Executadas

(Recursos de Transporte × Regra de Sequenciamento)

Recursos de Transporte	Regra de Sequenciamento	
	FIFO	EPME
24m ³	79,79	66,50
30m ³	87,25	83,79
36m ³	87,75	87,17

Os valores mais elevados da variável NMEE são obtidos com o nível mais elevado de recursos de transporte, 36m³, e com a regra FIFO. No entanto, a interacção do factor experimental "recursos de transporte" com a regra FIFO revela a existência de acréscimos pouco significativos na variável NMEE quando o nível do factor experimental "recursos de transporte" aumenta. A interacção do factor experimental "recursos de transporte" com a regra EPME apresenta acréscimos na variável NMEE mais significativos quando o nível do factor experimental aumenta. Ou seja, os acréscimos no NMEE, provocados pelo aumento do nível de recursos de transporte, são mais significativos com a regra EPME do que com a regra FIFO.

É de referir ainda que a variável NMEE apresenta valores muito idênticos para as duas regras de sequenciamento quando o nível de recursos de transporte é de 36m³.

Na Tabela IX são apresentados os dados resultantes da interacção entre os factores experimentais "recursos de transporte × capacidade de colocação" (RETR×RECO).

Tabela IX - Número Médio de Encomendas Executadas

(Recursos de Transporte × Capacidade de Colocação)

Recursos de Transporte	Capacidade de Colocação		
	12,5m ³ /hora	25m ³ /hora	35m ³ /hora
24m ³	55,67	78,38	82,69
30m ³	83,06	86,44	87,06
36m ³	86,38	87,88	88,13

Os dados resultantes da interacção entre os factores experimentais "recursos de transporte × capacidade de colocação" permitem verificar que, em relação ao factor experimental "recursos de transporte": (i) o valor mais elevado da variável NMEE é obtido com o nível mais elevado de recursos de transporte (36m³), para qualquer nível de capacidade de colocação e, (ii) são menos significativos os acréscimos na variável NMEE quando o nível de recursos de transporte aumenta de 30m³ para 36m³, do que quando aumenta de 24m³ para 30m³.

Em relação ao factor experimental "capacidade de colocação" verifica-se que, qualquer que seja o nível do factor experimental "recursos de transporte", o valor mais elevado da variável NMEE é obtido com o nível de 35m³/hora. Por outro lado, verifica-se também que os acréscimos na variável NMEE são mais significativos quando o factor experimental "capacidade de colocação" aumenta de 12,5m³/hora para 25m³/hora do que quando aumenta de 25m³/hora para 35m³/hora.

Em síntese, a análise dos dados relativamente à variável NMEE e aos factores experimentais "recursos de

transporte", "regra de sequenciamento" e "capacidade de colocação", estatisticamente significativos, bem como das interações "recursos de transporte × regra de sequenciamento" e "recursos de transporte × capacidade de colocação", também estatisticamente significativas, permite concluir que: (i) os valores mais elevados da variável NMEE são obtidos com os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação" e com a regra FIFO; (ii) é pouco significativo o acréscimo na variável NMEE quando o nível de recursos de transporte aumenta de 30m³ para 36m³; (iii) é pouco significativo o acréscimo na variável NMEE quando o nível de capacidade de colocação aumenta de 25m³/hora para 35m³/hora; (iv) a interacção dos factores experimentais "recursos de transporte × regra de sequenciamento" confirma que o valor mais elevado da variável NMEE é obtido com o nível mais elevado da factor experimental "recursos de transporte" e com a regra FIFO e, (v) a interacção dos factores experimentais "recursos de transporte × capacidade de colocação" confirma também que o valor mais elevado da variável NMEE é obtido com os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação".

Resultados para o Tempo Médio da Encomenda no Sistema

A Tabela X mostra os resultados das observações realizadas para a variável "tempo médio da encomenda no sistema" (TMES).

Tabela X - Tempo Médio da Encomenda no Sistema

	TMES (minutos)	Observações
TOTAL	6 735,50	* 140
Recursos de Transporte		
24m ³	18 005,34	* 44
30m ³	2 779,04	48
36m ³	361,27	48
Regra de Sequenciamento		
FIFO	7 671,61	72
EPME	5 744,32	* 68
Capacidade de Colocação		
12,5m ³ /hora	13 660,30	* 44
25m ³ /hora	6 023,23	48
35m ³ /hora	1 061,04	48

m³ - Metros cúbicos

FIFO - *First In, First Out*

EPME - Executa Primeiro Maior Encomenda

Na tabela anterior alguns valores da coluna das Observações estão assinalados com asterisco (*) para indicar a recolha de menos quatro observações. Tal como foi referido na secção anterior, a configuração 24m³×EPME×12,5m³/hora (RETR×RSEQ×RECO) não permitiu a recolha de dados para as oito replicações previstas, devido a problemas de dimensionamento dos vectores estatísticos do *software* utilizado. Também neste caso, e uma vez que o sistema se encontra estabilizado (*steady state*), admite-se que os resultados não seriam substancialmente diferentes que levassem à obtenção de conclusões distintas.

A variável TMES apresenta diminuições bastante significativas quando os níveis dos recursos de transporte e de capacidade de colocação aumentam. Das duas regras de

sequenciamento consideradas, a EPME é a que permite ter um valor mais baixo para a variável TMES.

A análise de variância dos resultados para o tempo médio da encomenda no sistema é apresentada na Tabela XI.

Tabela XI - Análise de Variância da Variável Tempo Médio da Encomenda no Sistema

FONTE		GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	QUADRADOS MÉDIOS	VALOR F	PROB > F
Entre Grupos		17	21715416106,300	1277377418,000	34,027	0,000
Dentro de Grupos		122	4579879988,750	37539999,908		
Total		139	26295296095,000	189174792,050		

FONTE		GRAUS LIBERDADE	SOMA QUADRADOS	VALOR F	PROB > F
H ₀₂	RETR	2	8290059101,720	110,416	0,000 **
H ₀₄	RSEQ	1	57648254,222	1,536	0,218
H ₀₆	RECO	2	4293804544,440	57,190	0,000 **
H ₀₈	RETR*RSEQ	2	153209182,768	2,041	0,134
H ₀₁₀	RSEQ*RECO	2	642068747,435	8,552	0,000 **
H ₀₁₂	RETR*RECO	4	5013924024,300	33,391	0,000 **
H ₀₁₄	RETR*RSEQ*RECO	4	2749780852,710	18,312	0,000 **

** Estatisticamente significativo para $\alpha = 0,01$

Os factores experimentais "recursos de transporte" (RETR) e "capacidade de colocação" (RECO) são estatisticamente significativos. Por isso, as hipóteses H₀₂ e H₀₆ são rejeitadas. Isto é, o tempo médio da encomenda no sistema varia com o nível de recursos de transporte e também com a capacidade de colocação. Os dados da análise de variância revelam também que as interacções entre os factores experimentais "regra de sequenciamento x capacidade

de colocação" (RSEQ×RECO) e entre os factores experimentais "recursos de transporte × capacidade de colocação" (RETR×RECO) são estatisticamente significativas, sendo, por isso, rejeitadas as hipóteses H_{010} e H_{012} . Constata-se ainda que a interacção entre os três factores experimentais, "recursos de transporte × regra de sequenciamento × capacidade de colocação", (RETR×RSEQ×RECO) é estatisticamente significativa, pelo que é também rejeitada a hipótese H_{014} . As hipóteses H_{04} e H_{08} não são rejeitadas.

Analizamos a seguir os resultados das interacções entre os factores experimentais "regra de sequenciamento × capacidade de colocação", entre "recursos de transporte × capacidade de colocação" e entre "recursos de transporte × regra de sequenciamento × capacidade de colocação".

Na Tabela XII podemos ver os resultados da interacção entre os factores experimentais "regra de sequenciamento × capacidade de colocação" (RSEQ×RECO).

**Tabela XII - Tempo Médio da Encomenda no Sistema
(Regra de Sequenciamento × Capacidade de Colocação)**

Regra de Sequenciamento	Capacidade de Colocação		
	12,5m ³ /hora	25m ³ /hora	35m ³ /hora
FIFO	18 414,63	3 859,79	740,42
EPME	7 955,10	8 264,67	1 381,67

A análise dos dados da Tabela XII mostra que qualquer que seja a regra de sequenciamento, é com um nível de capacidade de colocação de 35m³/hora que se obtém o valor mais baixo para a variável TMES. Por outro lado, verifica-se

também que, à excepção da interacção "FIFO×12,5m³/hora", a variável TMES apresenta valores mais baixos com a regra FIFO, qualquer que seja o nível do facto experimental "capacidade de colocação". O facto de a variável TMES apresentar um valor mais elevado na interacção "FIFO×12,5m³/hora", em comparação com a interacção "EPME×12,5m³/hora", deve ser entendido como uma situação pontual.

Em termos de decréscimo relativamente à variável TMES, quando o nível da capacidade de colocação aumenta, verifica-se a existência de uma diferença. Na regra FIFO, o aumento no nível de capacidade de colocação é acompanhado de decréscimos bastante significativos na variável TMES. Na regra EPME, verifica-se que o aumento no nível da capacidade de colocação de 12,5m³/hora para 25m³/hora provoca um acréscimo na variável TMES e, quando o nível de capacidade de colocação aumenta de 25m³/hora para 35m³/hora, verifica-se um decréscimo na variável TMES.

A Tabela XIII mostra os resultados da interacção entre os factores experimentais "recursos de transporte × capacidade de colocação".

Tabela XIII - Tempo Médio da Encomenda no Sistema

(Recursos de Transporte × Capacidade de Colocação)

Recursos de Transporte	Capacidade de Colocação		
	12,5m ³ /hora	25m ³ /hora	35m ³ /hora
24m ³	39 575,00	17 324,38	2 509,06
30m ³	7 283,13	599,00	455,00
36m ³	601,44	263,31	219,06

Constata-se, pela análise dos resultados na Tabela XIII, que, qualquer que seja o nível do factor experimental "recursos de transporte", é com o nível mais elevado do factor experimental "capacidade de colocação", 35m³/hora, que a variável TMES tem o valor mais baixo. A análise dos resultados revela ainda, por outro lado, que quando o nível de capacidade de colocação aumenta de 12,5m³/hora para 25m³/hora, os decréscimos na variável TMES são mais significativos com um nível de recursos de transporte de 30m³. Quando o nível do factor experimental "capacidade de colocação" aumenta de 25m³/hora para 35m³/hora, os decréscimos na variável TMES são mais significativos com um nível de recursos de transporte de 24m³.

Pode verificar-se também que, qualquer que seja o nível do factor experimental "capacidade de colocação", é com o nível mais elevado do factor experimental "recursos de transporte", 36m³, que a variável TMES regista o valor mais baixo. Por outro lado, os decréscimos na variável TMES, quando o nível do factor experimental "recursos de transporte" aumenta de 24m³ para 30m³, são mais significativos para um nível de 25m³/hora do factor

experimental "capacidade de colocação"; quando o factor experimental "recursos de transporte" aumenta de 30m³ para 36m³, o decréscimo na variável TMES é mais significativo para um nível de 12,5m³/hora do factor experimental "capacidade de colocação".

A análise da interacção entre os três factores experimentais, "recursos de transporte × regra de sequenciamento × capacidade de colocação" (RETR×RSEQ×RECO) é apresentada na Tabela XIV.

Tabela XIV - Tempo Médio da Encomenda no Sistema
(Recursos de Transporte × Regra de Sequenciamento ×
Capacidade de Colocação)

Recursos de Transporte	12,5m ³ /hora		25m ³ /hora		35m ³ /hora	
	FIFO	EPME	FIFO	EPME	FIFO	EPME
24m ³	50 200,00	18 325,00	10 878,75	23 770,00	1 652,38	3 365,75
30m ³	4 570,00	9 996,25	463,63	734,38	363,75	546,25
36m ³	473,88	729,00	237,00	289,63	205,13	233,00

Os resultados apresentados na Tabela XIV permitem verificar que: (i) o valor mais baixo da variável TMES é obtido com o nível mais elevado do factor experimental "recursos de transporte", qualquer que seja a regra de sequenciamento e o nível do factor experimental "capacidade de colocação"; (ii) à excepção da interacção "30m³×EPME×35m³/hora", o valor mais baixo da variável TMES é obtido com o nível mais elevado do factor experimental "capacidade de colocação", 35m³/hora, qualquer que seja o

nível do factor experimental "recursos de transporte" e a regra de sequenciamento; (iii) à excepção da interacção " $24\text{m}^3 \times \text{FIFO} \times 12,5\text{m}^3/\text{hora}$ ", a variável TMES regista valores mais baixos com a regra FIFO, qualquer que seja o nível dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação"; (iv) quando o factor experimental "recursos de transporte" aumenta de 24m^3 para 30m^3 , o decréscimo na variável TMES é mais significativo com um nível de capacidade de colocação de $25\text{m}^3/\text{hora}$ e a regra EPME; (v) quando o factor experimental "recursos de transporte" aumenta de 30m^3 para 36m^3 , o decréscimo na variável TMES é mais significativo com um nível de capacidade de colocação de $12,5\text{m}^3/\text{hora}$ e a regra EPME; (vi) quando o nível do factor experimental "capacidade de colocação" aumenta de $12,5\text{m}^3/\text{hora}$ para $25\text{m}^3/\text{hora}$, o decréscimo mais significativo na variável TMES é registado com um nível do factor experimental "recursos de transporte" de 30m^3 e com a regra EPME; (vii) quando o nível do factor experimental "capacidade de colocação" aumenta de $25\text{m}^3/\text{hora}$ para $35\text{m}^3/\text{hora}$, o decréscimo mais significativo na variável TMES é registado com um nível do factor experimental "recursos de transporte" de 24m^3 e com a regra EPME e, (viii) a utilização da regra FIFO em vez da regra EPME provoca o maior decréscimo na variável TMES quando o nível do factor experimental "recursos de transporte" é de 24m^3 e quando o nível do factor experimental "capacidade de colocação" é de $25\text{m}^3/\text{hora}$.

A situação referida em (iii), sobre os valores mais baixos da variável TMES serem obtidos com a regra FIFO,

independentemente dos níveis dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação", à excepção da interacção " $24\text{m}^3 \times \text{FIFO} \times 12,5\text{m}^3/\text{hora}$ ", deve ser entendida como uma situação pontual que não inviabiliza a afirmação deste ponto.

Em síntese, a análise dos dados relativos à variável TMES e aos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação", estatisticamente significativos, bem como em relação às interacções "regra de sequenciamento \times capacidade de colocação" (RSEQ \times RECO), "recursos de transporte \times capacidade de colocação" (RETR \times RECO) e "recursos de transporte \times regra de sequenciamento \times capacidade de colocação" (RETR \times RSEQ \times RECO), também estatisticamente significativas, permitem concluir que: (i) a variável TMES regista valores mais baixos quando os factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação" estão nos respectivos níveis máximos; (ii) embora o factor experimental "regra de sequenciamento" não seja estatisticamente significativo, verifica-se que nas interacções "regra de sequenciamento \times capacidade de colocação" (RSEQ \times RECO) e "recursos de transporte \times regra de sequenciamento \times capacidade de colocação" (RETR \times RSEQ \times RECO), estatisticamente significativas, é com a regra FIFO que a variável TMES regista os valores mais baixos, à excepção de duas interacções (" $\text{FIFO} \times 12,5\text{m}^3/\text{hora}$ " e " $24\text{m}^3 \times \text{FIFO} \times 12,5\text{m}^3/\text{hora}$ "); (iii) as duas excepções anteriormente referidas devem ser consideradas como

pontuais; (iv) na interacção dos factores experimentais "regra de sequenciamento × capacidade de colocação" (RSEQ×RECO) a variável TMES regista valores mais baixos com o nível mais elevado do factor experimental "capacidade de colocação"; (v) na interacção dos factores experimentais "recursos de transporte × capacidade de colocação" (RETR×RECO), o valor mais baixo da variável TMES é obtido com os níveis mais elevados dos factores experimentais, 36m³ e 35m³/hora; (vi) na interacção "recursos de transporte × capacidade de colocação" (RETR×RECO), os decréscimos na variável TMES, quando os recursos de transporte aumentam de 24m³ para 30m³, são mais significativos quando o nível do factor experimental "capacidade de colocação" é de 25m³/hora e, quando os recursos de transporte aumentam de 30m³ para 36m³, os decréscimos são mais significativos para um nível de 12,5m³/hora do factor experimental "capacidade de colocação"; (vii) na interacção "recursos de transporte × capacidade de colocação" (RETR×RECO), os decréscimos na variável TMES, quando o nível do factor experimental "capacidade de colocação" aumenta de 12,5m³/hora para 25m³/hora, são mais significativos com um nível de 30m³ do factor experimental "recursos de transporte" e, quando o nível do factor experimental "capacidade de colocação" aumenta de 25m³/hora para 35m³/hora, o decréscimo é mais significativo para um nível de 24m³ do factor experimental "recursos de transporte" e, (viii) os resultados da interacção "recursos de transporte × regra de sequenciamento × capacidade de

colocação" (RETR×RSEQ×RECO), confirmam as conclusões (vi) e (vii) considerando a utilização da regra EPME.

Resumo

Este capítulo apresentou os resultados do estudo experimental e do estudo principal do modelo de simulação construído para avaliar o desempenho de uma central radial de produção de betão.

A realização do estudo experimental permitiu determinar o período de estabilização do modelo. A determinação do período de estabilização do modelo é importante para se saber quais os dados recolhidos que devem ser eliminados para evitar distorções na análise dos resultados da simulação. A distorção na análise dos resultados é provocada pelas condições de arranque utilizadas no modelo de simulação.

O estudo principal apresenta os resultados das duas variáveis utilizadas para medir o desempenho do modelo de simulação da central radial de produção de betão, o "número médio de encomendas executadas" e o "tempo médio da encomenda no sistema". As duas variáveis foram avaliadas considerando dezoito configurações distintas. Cada configuração foi definida pela combinação de diferentes níveis dos três factores experimentais. Os factores experimentais utilizados foram os recursos de transporte com três níveis (24m³, 30m³ e 36m³), a regra de sequenciamento com dois níveis (FIFO e EPME) e a capacidade de colocação com três níveis (12,5m³/hora, 25m³/hora e 35m³/hora). Para cada

uma das dezoito configurações foram recolhidos os dados equivalentes a oito replicações.

Os dados recolhidos foram sujeitos ao tratamento estatístico através da análise de variância, possibilitando o estabelecimento de conclusões relativamente às hipóteses de investigação.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Este trabalho de investigação analisou o processo de produção de betão de uma empresa que opera uma central radial, numa localidade a sul de Lisboa, e que adiante se passa a designar por empresa ABC. A produção de betão é um caso particular do problema de "produção por encomenda".

Com base em informação recolhida junto da empresa ABC, analisou-se o impacte no desempenho da central radial de produção de betão resultante da utilização de diferentes níveis de recursos de transporte, diferentes regras de sequenciamento de fabrico de encomendas recebidas, diferentes níveis de capacidade de colocação do betão e da interacção entre estes factores. Para analisar o impacte no desempenho da central, foram utilizadas duas variáveis: "número médio de encomendas executadas" e "tempo médio da encomenda no sistema". No total foram considerados 18 cenários, correspondendo a 3 níveis de recursos de transporte, 2 regras de sequenciamento e 3 níveis de capacidade de colocação do betão ($3 \times 2 \times 3$). Como objectivo adicional da investigação, pretendia-se determinar qual a configuração dos três factores experimentais mais adequada, isto é, quais os níveis de recursos de transporte e de capacidade de colocação do betão e qual a regra de sequenciamento que permitem, em interacção, executar o maior número de encomendas e com o menor tempo médio da encomenda no sistema.

Para realizar este trabalho, foi utilizado um programa de simulação digital, o qual, como refere Walde [1991], permite ver como é que um sistema de produção reage quando determinadas condições do sistema são alteradas sem, no entanto, corromper o sistema real. Na revisão da literatura realizada, constatámos que existem duas técnicas para a resolução de problemas de sequenciamento das actividades com restrições de recursos: Heurísticas e Modelos de Optimização. Os Modelos de Optimização encontram a solução óptima para um determinado problema. Contudo, a complexidade dos problemas de sequenciamento com restrições de recursos, devido à existência de múltiplos objectivos, frequentemente conflituosos, e à incerteza [Lorterapong, 1994], e os elevados requisitos em termos de cálculos, mesmo para pequenos problemas [Oguz e Bala, 1994], tornam muito difícil o recurso aos Modelos de Optimização. As técnicas Heurísticas, embora não garantam soluções óptimas, permitem obter boas soluções para problemas práticos [Lorterapong, 1994].

Ao optar pela utilização do programa de simulação digital, tivemos que considerar a utilização de duas heurísticas para sequenciar o fabrico das encomendas recebidas. De entre as várias heurísticas referenciadas na revisão da literatura, decidimos utilizar a *First In, First Out* (FIFO), uma regra de prioridade simples, baseada no momento de chegada [Panwalkar e Iskander, 1977] da encomenda. Como segunda heurística, propusemos a Executa Primeiro Maior

Encomenda (EPME), uma regra baseada na quantidade de betão encomendada, dando prioridade às encomendas de maior dimensão.

A selecção das heurísticas ou regras de sequenciamento não é aleatória, deve ter em conta a medida de desempenho utilizada para avaliar o sequenciamento ou os objectivos do problema de sequenciamento. Quando se tratam de problemas de sequenciamento da produção por encomenda, o objectivo é, normalmente, o cumprimento das datas de conclusão (*due dates*) [Kanet e Hayya, 1982; Baker, 1984; Weeks, 1979; Vepsäläinen e Morton, 1987].

No caso desta investigação, e dado que os diferentes níveis de recursos de transporte e de capacidade de colocação foram definidos tendo por base dados reais da empresa ABC, optámos também por seleccionar as duas regras de sequenciamento que mais se aproximam da forma como, na realidade, as encomendas são seleccionadas para fabrico na central radial da empresa ABC: FIFO e EPME.

A análise dos dados relativamente à variável "número médio de encomendas executadas" (NMEE) permite concluir que: (i) os factores experimentais "recursos de transporte", "regra de sequenciamento" e "capacidade de colocação", são estatisticamente significativos, ou seja, o NMEE varia com o nível dos recursos de transporte, com a regra de sequenciamento e com a capacidade de colocação; (ii) a interacção dos factores experimentais "recursos de transporte × regra de sequenciamento" é estatisticamente significativa, o que quer dizer que existe efeito de

interacção entre o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento no NMEE; (iii) a interacção dos factores experimentais "recursos de transporte × capacidade de colocação" é estatisticamente significativa, o que quer dizer que existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no NMEE; (iv) os valores mais elevados da variável NMEE são obtidos com os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação", 36m^3 e $35\text{m}^3/\text{hora}$, respectivamente, e com a regra FIFO e, (v) as interacções dos factores experimentais "recursos de transporte × regra de sequenciamento" e "recursos de transporte × capacidade de colocação", confirmam que os valores mais elevados da variável NMEE são obtidos com os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação", 36m^3 e $35\text{m}^3/\text{hora}$, respectivamente, e com a regra FIFO.

Em relação à variável "tempo médio da encomenda no sistema" (TMES), a análise dos dados permite concluir que: (i) os factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação" são estatisticamente significativos, o que quer dizer que o TMES varia com os níveis dos factores experimentais; (ii) a interacção "regra de sequenciamento × capacidade de colocação" é estatisticamente significativa, ou seja, existe efeito de interacção entre a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no TMES; (iii) a interacção "recursos de transporte × capacidade de colocação" é estatisticamente

significativa, ou seja, existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no TMES; (iv) a interacção "recursos de transporte x regra de sequenciamento x capacidade de colocação" é estatisticamente significativa o que quer dizer que existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no TMES; (v) os valores mais baixos da variável TMES são obtidos com os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação", 36m^3 e $35\text{m}^3/\text{hora}$, respectivamente; (vi) a interacção "recursos de transporte x capacidade de colocação" confirma que é com os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação" que a variável TMES regista os valores mais baixos; (vii) na interacção "regra de sequenciamento x capacidade de colocação" verifica-se que é com o nível mais elevado do factor experimental "capacidade de colocação" e com a regra FIFO que a variável TMES regista valores mais baixos e, (viii) na interacção dos três factores experimentais "recursos de transporte x regra de sequenciamento x capacidade de colocação" verifica-se que a variável TMES regista os valores mais baixos com os níveis mais elevados dos factores experimentais "recursos de transporte" e "capacidade de colocação" e com a regra FIFO.

Tendo em atenção que a interacção "recursos de transporte x regra de sequenciamento x capacidade de

colocação" não é estatisticamente significativa para a variável NMEE, a hipótese nula " $H_{0_{13}}$ - Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas ($RETR \times RSEQ \times RECO$)" não é rejeitada, logo, admite-se que o efeito de interacção entre os três factores experimentais não tem impacte no NMEE. Relativamente à variável TMES, e dado que a interacção entre os três factores experimentais foi considerada como estatisticamente significativa para esta variável, para se obterem valores mais baixos para a variável TMES, a melhor configuração, considerando a interacção dos três factores experimentais, é " $36m^3 \times FIFO \times 35m^3/hora$ ".

Consideramos como um tópico possível para investigação em trabalhos posteriores, a análise das variáveis NMEE e TMES por tipos de encomendas (pequenas, médias e grandes), bem como a inclusão dos custos associados a cada tipo de encomenda.

Outro tópico para investigações futuras é a comparação das soluções obtidas, utilizando heurísticas com as soluções obtidas por modelos de optimização, complementada com uma análise custo-benefício de cada uma das soluções. A ideia é procurar saber até que ponto se justifica a procura da solução óptima para determinado problema de sequenciamento, em empresas com características idênticas à que serviu de base à realização deste trabalho de investigação.

BIBLIOGRAFIA

- ADAM, N., e SURKIS, J., "A Comparison of Capacity Planning Techniques in a Job Shop Control System", Management Science, Volume 23, N°. 9, May, 1977, pp. 1011-1015.
- ANÓNIMO 1, "Betão Pronto, Uma Solução Eficaz na Indústria da Construção Civil".
- ANÓNIMO 2, "Breves Notas sobre o Betão Pronto em Portugal".
- ANÓNIMO 3, "Memorando - A APEB e a Indústria de Betão Pronto".
- BAKER, K. R., "Sequencing Rules and Due-Date Assignments in a Job Shop", Management Science, Volume 30, N°. 9, September, 1984, pp. 1093-1104.
- BERRY, W. L., SCHMITT, T. G., e VOLLMANN, T. E., "Capacity Planning Techniques for Manufacturing Control Systems: Information Requirements and Operational Features", Journal of Operations Management, Volume 3, N°. 1, November, 1982, pp. 13-25.
- BOWERS, M. R., e AGARWAL, A., "Lower In-Process Inventories and Better On-Time Performance at Tanner Companies, Inc.", Interfaces, Volume 25, N°. 4, July-August, 1995, pp. 30-43.
- CAMEJO, F., "Betão Pronto em Portugal - Betão Liz, S.A.", Magazine ATIC, N° 9, Novembro 1991, pp. 18-24.
- CHAN, F. T. S., "Using Simulation to Predict System Performance: A Case Study of an Electro-Phoretic Deposition Plant", Integrated Manufacturing Systems, Volume 6, N°. 5, 1995, pp. 27-38.
- CONWAY, R. W., "Some Tactical Problems in Digital Simulation", Management Science, Volume 10, N°. 1, October, 1963, pp. 47-61.
- COOPER, D. F., "Heuristics for Scheduling Resource-Constrained Projects: An Experimental Investigation", Management Science, Volume 22, N°. 11, July, 1976, pp. 1186-1194.
- COUTINHO, A. S., Fabrico e Propriedades do Betão - Volume I, 2ª Edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1988.
- DAVIS, E. W., e HEIDORN, G. E., "An Algorithm for Optimal Project Scheduling Under Multiple Resource Constraints", Management Science, Volume 17, N°. 12, August, 1971, pp. B803-B816.

- DAVIS, E. W., e PATTERSON, J. H., "A Comparison of Heuristic and Optimum Solutions in Resource-Constrained Project Scheduling", Management Science, Volume 21, N°. 8, April, 1975, pp. 944-955.
- DEMEULEMEESTER, E., e HERROELEN, W., "A Branch-and-Bound Procedure for the Multiple Resource-Constrained Project Scheduling Problem", Management Science, Volume 38, N°. 12, December, 1992, pp. 1803-1818.
- DR, "Portaria n° 850/94 de 22 de Setembro", Diário da República - I Série-B, N°. 220 - 22-9-1994, 1994, pp. 5681-5683.
- FERREIRA, C. A., "As Origens do Betão Armado em Portugal e o Registo de Patente de François Hennebique", Magazine ATIC, N° 17, Novembro 1995, pp. 21-24.
- FLANDERS, S. W., e DAVIS, W. J., "Scheduling a Flexible Manufacturing System wiht Tooling Constraints: An Actual Case Study", Interfaces, Volume 25, N°. 2, March-April, 1995, pp. 42-54.
- FORTUIN, L., "Performance Indicators - Why, Where and How?", European Journal Of Operational Research, Volume 34, 1988 pp. 1-9.
- FUMERO, F., e VERCELLIS, C., "Capacity Analysis in Repetitive Assemble-to-Order Manufacturing Systems", European Journal Of Operational Research, Volume 78, N°. 2, October 27, 1994, pp. 204-215.
- HOLSTEIN, W. K., "Production Planning and Control Integrated", Harvard Business Review, Volume 46, N°. 3, May-June, 1968, pp. 121-140.
- INE, Estatísticas da Construção de Edifícios - Licenciamento/Habitação 1991/92, Instituto Nacional de Estatística, Lisboa, 1994.
- JEFFCOAT, D. E., e BULFIN, R. L., "Simulated Annealing for Resource-Constrained Scheduling", European Journal Of Operational Research, Volume 70, N°. 1, October 8, 1993, pp. 43-51.
- KANET, J. J., e HAYYA, J. C., "Priority Dispatching with Operation Due Dates in a Job Shop", Journal Of Operations Management, Volume 2, N°. 3, May, 1982, pp. 167-175.
- KOH, K.-H., SOUZA, R. de e HO, N.-C., "Direct Database-Simulation of a Job-Shop", International Journal of Production Economics, Volume 39, N°. 3, May, 1995, pp. 281-287.

- LEE, J.-K., e KIM, Y.-D., "Search Heuristics for Resource Constrained Project Scheduling", Journal of the Operational Research Society, Volume 47, N°. 5, May, 1996, pp. 678-689.
- LORTERAPONG, P., "A Fuzzy Heuristic Method For Resource-Constrained Project Scheduling", Project Management Journal, Volume 25, N°. 4, December, 1994, pp. 12-18.
- MCKAY, K. N., SAFAYENI, F. R., e BUZACOTT, J. A., "Job-Shop Scheduling Theory: What Is Relevant?", Interfaces, Volume 18, N°. 4, July-August, 1988, pp. 84-90.
- NKASU, M. M., "COMSARS: A Computer-Sequencing Approach to Multi-Resource Constrained Scheduling - Part 1: Deterministic Networks", International Journal of Project Management, Volume 12, N°. 3, August, 1994, pp. 183-192.
- OGUZ, O., e BALA, H., "A Comparative Study of Computational Procedures for the Resource Constrained Project Scheduling Problem", European Journal Of Operational Research, Volume 72, N°. 2, January 27, 1994, pp. 406-416.
- OLIVEIRA, A. e, "Laboratório Nacional de Engenharia Civil", Brochura do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1991.
- PANWALKAR, S. S., e ISKANDER, W. "A Survey of Scheduling Rules", Operations Research, Volume 25, N°. 1, January-February, 1977, pp. 45-61.
- PATO, J., Entrevista com J. Pato, Secretário Geral da Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto (APEB), 1996.
- PEREIRA, A. A. F., The Effect of Assignment and Sequencing Rules on The Performance of a Flexible Manufacturing System, Ph.D. dissertation, Graduate School of Clemson University, EUA, 1990.
- PINDER, J. P., "An Approximation of a Markov Decision Process for Resource Planning", Journal of the Operational Research Society, Volume 46, N°. 7, July, 1995, pp. 819-830.
- PRATES, M., "Estradas em Betão", Magazine ATIC, N° 17, Novembro 1995, pp. 33-42.
- PRITSKER, A. A. B., WATTERS, L. J., e WOLFE, P. M., "Multiproject Scheduling with Limited-Resources: A Zero-One Programming Approach", Management Science, Volume 16, N°. 1, September, 1969, pp. 93-108.

- PRITSKER, A. A. B., Introduction to Simulation and SLAM II, A Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- PRITSKER, A. A. B., SIGAL, C. E. e HAMMESFAHR, R. D. J., SLAM II - Network Models for Decision Support, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1989.
- ROY, R., e MEIKLE, S. E., "The Role of Discrete Event Simulation Techniques in Finite Capacity Scheduling", Journal of the Operational Research Society, Volume 46, N°. 11, November, 1995, pp. 1310-1321.
- SAVSAR, M., e AL-JAWINI, A., "Simulation Analysis of Just-In-Time Production Systems", International Journal Of Production Economics, Volume 42, N°. 1, November, 1995, pp. 67-78.
- SERAFINI, P., e SPERANZA, M.G., "A Decomposition Approach in a DSS for a Resource Constrained Scheduling Problem", European Journal Of Operational Research, Volume 79, N°. 2, December 8, 1994, pp. 208-219.
- SINHA, G. P., CHANDRASEKARAN, B. S., MITTER, N., DUTTA, G., SINGH, S. B., CHOUDHURY, A. R., e ROY, P. N., "Strategic and Operational Management with Optimization at Tata Steel", Interfaces, Volume 25, N°. 1, January-February, 1995, pp. 6-19.
- VEPSALAINEN, A. P. J., e MORTON, T. E., "Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Costs", Management Science, Volume 33, N°. 8, August, 1987, pp. 1035-1047.
- WISEU, J. C. S., História do Betão Armado em Portugal-Incluindo a História do Betão Pré-Esforçado, Associação Técnica da Indústria do Cimento, Lisboa, 1993.
- VOLLMANN, T. E., BERRY, W. L., e WHYBARK, D. C., Manufacturing Planning and Control Systems, Dow Jones-Irwin, Homewood, Illinois, 1984.
- WALDE, E. V. D., "Computer Simulation in Manufacturing", Production and Inventory Management Journal, Second Quarter, 1991, pp. 80-83.
- WEEKS, J. K., "A Simulation Study of Predictable Due-Dates", Management Science, Volume 25, N°. 4, April, 1979, pp. 363-373.